

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Sähköverkot ja suurjännitetekniikka

DANIEL KUOSA

VIKA- JA KUNNOSSAPITOTIETOJEN HYÖDYNTÄMINEN SUUR- JÄNNITEKYTKINLAITTEIDEN KUNNONHALLINNASSA

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 10.9.2007.

Työn valvoja

Professori Liisa Haarla

Työn ohjaaja

TkL Pasi Yli-Salomäki

Tekijä: Daniel Kuosa

Työn nimi: "Vika- ja kunnossapitotietojen hyödyntäminen suurjännitekytkinlaitteiden kunnonhallinnassa"

Päivämäärä: 10.9.2007

Sivumäärä: 102

Osasto: Sähkö- ja tietoliikennetekniikka

Pääaine: Sähköverkot ja suurjännitetekniikka

Työn valvoja: Professori Liisa Haarla

Työn ohjaaja: TkL Pasi Yli-Salomäki

Tiivistelmäteksti:

Kunnonhallinnan tehtävänä on ylläpitää järjestelmän toimintoja ja ennaltaehkäistä vikojen vakavia seurauksia mahdollisimman kustannustehokkaasti.

Tässä diplomityössä käydään läpi yksinkertaisin tilastollisin menetelmin kantaverkon katkaisijoiden ja erottimien vika- ja kunnossapitotietoja yli kahdelta vuosikymmeneltä. Tavoitteina on tutkia onko vikataajuuden ja iän välillä yhteyttä sekä arvioida ennakoivan kunnossapidon tehokkuutta.

Työn ensimmäisessä osuudessa käsitellään yleisiä asioita, luotettavuuskeskeisen kunnossapidon (RCM eli Reliability Centred Maintenance) teoriaa ja esitellään tarkasteltavat laitteet eli erottimet ja katkaisijat. Keskimmaisessä osuudessa laitevikatiedoille ja kunnonvalvontamittauksille tehdään tilastollinen trendianalyysi ikääntymisen havaitsemiseksi. Myös kunnossapito- ja elinkaarikustannuksia on tarkasteltu.

Johtopäätöksissä todetaan, että erottimien kunnossapitoa on mahdollista muuttaa aikaperustaisesta enemmän kuntoperusteisempaan suuntaan. Myös uusille kaasukatkaisijoille voidaan käyttää nykyistä pidempiä huoltovälejä.

Työ on osa Suomen kantaverkkoyhtiön Fingrid Oyj:n 2000-luvulla aloittamaa sähköasemalaitteiden jatkuvaa RCM-analyysiä.

Avainsanat:

RCM, Luotettavuuskeskeinen kunnossapito, kytkinlaitteet, katkaisija, erotin, kunnonhallinta, vikadata, vikataajuus, Fingrid Oyj

Helsinki University of Technology

Abstract of Master's Thesis

Author: Daniel Kuosa

English Title: "Using Failure and Service Data in the Maintenance Management of High Voltage Switchgear"

Date: September 10, 2007

Number of Pages: 102

Department: Electrical and Communications Engineering

Professorship: Power Systems and High Voltage Engineering

Supervisor: Professor Liisa Haarla

Instructor: Lic.Sc. Pasi Yli-Salomäki

Abstract:

The purpose of maintenance management is to maintain the functions of a system and to prevent serious consequences of failures while being cost-efficient.

In this master's thesis simple statistical methods are applied to analyse failure and service data collected over more than two decades in the Finnish main grid. The subject of the study is high voltage switchgear ie. circuit breakers and disconnectors. The overall objectives are to determine if any dependency between age and failure frequency exists, and to evaluate the efficiency of preventive maintenance tasks.

The first chapters of the thesis deal with general aspects of the study, the basic theory of reliability centred maintenance (RCM) and the description of disconnectors and circuit breakers. In the middle section statistical trend analysis is applied to failure and service data to check if any ageing is observable. Maintenance and life-cycle costs have also been studied.

It is concluded that it is possible to move from a time based to a more condition based approach in disconnector maintenance. It is also possible to apply longer maintenance intervals for new SF₆ circuit breakers.

This thesis is a part of a continuous RCM-analysis of high voltage substation equipment in the Finnish main grid. The analysis was first launched in the beginning of the decade.

Key words:

RCM, Reliability Centred Maintenance, HV Switchgear, Circuit Breaker, Disconnector, Maintenance Management, Failure Data, Failure Frequency, Fingrid

ALKULAUSE

Tämä diplomityö on tehty Fingrid Oyj:ssä opinnäytteeksi Teknillisen korkeakoulun Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osastolle. Työn valvojana on toiminut professori Liisa Haarla, jota tahdon lämpimästi kiittää opastuksesta.

Erityisesti haluan kiittää työni ohjaajaa TkL Pasi Yli-Salomäkeä sekä ohjauksessa tiiviisti mukana ollutta DI Tuomas Laitista kaikesta saamastani tuesta. Kiitän myös esimiestäni DI Martti Heinosta ja koko Fingridin sähköistä porukkaa kannustavasta ilmapiiristä ja hyvistä neuvoista.

Lämmin kiitos kuuluu myös vaimolleni Anna-Marialle, joka jaksoi antaa tukensa koko opintojeni ajan.

Helsingissä 10.9.2007

Daniel Kuosa

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	1
1.1	TUTKIMUSKYSYMYKSET	2
1.2	LUKIJALLE	2
1.3	VIKoihin liittyviä käsitteitä	2
1.3.1	Vika ja vikaantuminen	2
1.3.2	Käyttöhäiriö	3
1.3.3	Laitevian asteet	3
1.3.4	Laitteiden luokittelu	3
1.3.5	Palvelutoimittaja	4
2	TUTKIMUKSEN AINEISTO.....	5
2.1	YLEISTÄ.....	5
2.2	LAITEVIKOJEN KIRJAAMINEN ELNETIIN	5
2.3	LAITEVIKAILMOITUKSET.....	6
2.4	KUNNOSSAPITOTIEDOT	8
2.5	LAITEMANUAALIT	9
3	LUOTETTAVUUSKESKEINEN KUNNOSSAPITO - RCM.....	10
3.1	YLEISTÄ.....	10
3.2	RCM-ANALYYSIN KULKU	11
3.2.1	Järjestelmä ja osajärjestelmä.....	12
3.2.2	Toiminto ja toiminnon vikaantuminen	12
3.2.3	Vikamuoto	13
3.2.4	Vikojen seurausten arviointi	14
3.2.5	Laite- ja järjestelmäsuuntautunut RCM.....	14
3.3	KUNNONHALLINTA.....	15
3.3.1	Yleistä	15
3.3.2	Kunnossapitotehtävät	15
3.3.3	Vikaantumiskäyrät	18
3.3.4	Vian kehittyminen	19
3.4	KANTAVERKON KYTKINLAITTEIDEN KUNNOSSAPITOTEHTÄVÄT.....	21
3.4.1	Asematarkastukset.....	21
3.4.2	Huollot.....	21
3.4.3	Lämpökuvaus.....	21
3.4.4	Ultraäänimittaus.....	22
3.5	KUNNOSSAPITOTEHTÄVIEN KOHDENTAMINEN	22
4	KVANTITATIIVINEN LUOTETTAVUUSANALYYSI.....	24

4.1	VIKATAAJUUDEN MALLINNUS	24
4.2	VIKOJEN VÄLINEN AIKA.....	25
4.3	KÄYTETTÄVYYS JA EPÄKÄYTETTÄVYYS.....	26
4.4	VIAN ETSINTÄVÄLI.....	26
4.5	RISKI	27
4.6	SENSUROINTI	27
5	EROTTIMET	29
5.1	YLEISTÄ.....	29
5.2	EROTTIMIEN ALALAITERYHMÄT	29
5.3	EROTTIMIEN OSAT	31
5.4	EROTTIMEN TOIMINNOT JA NIIDEN VIKAANTUMISET.....	32
5.5	TARKASTELTAVA EROTINPOPULAATIO	33
6	KATKAISIJAT.....	35
6.1	YLEISTÄ.....	35
6.2	KATKAISIJOIDEN ALALAITERYHMÄT	36
6.3	KATKAISIJAN OSAT.....	36
6.4	KATKAISIJAN TOIMINNOT JA NIIDEN VIKAANTUMISET	37
6.5	TARKASTELTAVA KATKAISIJAPOPULAATIO.....	38
7	VIKATIETOJEN ANALYYSI.....	40
7.1	YLEISTÄ.....	40
7.2	LAITEMÄÄRÄN JA VIKAKIRJAUSTEN KEHITTYMINEN	40
7.3	EROTTIMIEN VIAT	42
7.3.1	Erottimien Major- ja minor-vikaluokitukset	42
7.3.2	Erotinvikojen havainnot	42
7.4	KATKAISIJOIDEN VIAT	44
7.4.1	Katkaisijoiden Major- ja minor-vikaluokitukset	44
7.4.2	Katkaisijavikojen havainnot.....	45
7.5	KESKIMÄÄRÄISET VIKATAAJUUDET.....	47
7.5.1	Erottimien keskimääräiset vikataajuudet	47
7.5.2	Katkaisijoiden keskimääräiset vikataajuudet	48
7.6	IKÄÄNTYMISEN VAIKUTUS KYTKINLAITTEIDEN VIKATAAJUUTEEN	48
7.6.1	Havaintoaineiston käsittely taulukkolaskentaohjelmassa	48
7.6.2	Ikääntymisen vaikutus erottimien vikataajuuteen	50
7.6.3	Ikääntymisen vaikutus katkaisijoiden vikataajuuteen.....	53
7.7	VIKOJEN SIOITTUMINEN HUOLTOVÄLILLE.....	56
7.7.1	Erotinvikojen sijoittuminen huoltovälille	56
7.7.2	Katkaisijavikojen sijoittuminen huoltovälille	57

7.8	HUOLLOSSA HAVAITUT VIAT	58
7.9	KYTKENNOISSÄ HAVAITUT VIAT	59
7.10	KYTKINLAITTEIDEN AIHEUTTAMAT KÄYTTÖHÄIRIÖT	60
7.10.1	Erottimien käyttöhäiriöt 1998–2006	60
7.10.2	Katkaisijoiden käyttöhäiriöt 1998–2006	61
8	KUNNOSSAPITOTIETOJEN ANALYYSI.....	62
8.1	YLEISTÄ.....	62
8.2	HUOLLOISSA KIRJATUT LISÄTIEDOT	62
8.3	EROTINHUOLLOT	63
8.3.1	Erotihuoltojen määrän kehittyminen 1998–2006	63
8.3.2	Erottimien ylimenoresistanssin mittaukset	63
8.3.3	Erottimien kuntoarviot.....	65
8.4	KATKAISIJAHUOLLOT	66
8.4.1	Huoltomäärien kehittyminen 1998–2006.....	66
8.4.2	Toiminta-aikamittaukset.....	68
8.4.3	Ylimenoresistanssimittaukset.....	69
8.4.4	Kaasunpitoisuusmittaukset	70
8.4.5	Katkaisijoiden toimintakerrat.....	70
8.5	VALMISTAJIEN SUOSITTELEMAT HUOLTOVÄLIT.....	71
9	KYTKINLAITTEIDEN ELINKAARI- JA KUNNOSSAPITOKUSTANNUKSET	74
9.1	PERUSPARANNUSTEN AJOITTAMINEN.....	74
9.1.1	Ikäperustaiset korvausinvestoinnit	75
9.2	KYTKINLAITTEIDEN ELINKAARIKUSTANNUKSET	75
9.3	HUOLTOVÄLIN VAIKUTUS KUNNOSSAPIDON KUSTANNUKSIIN	77
10	JOHTOPÄÄTÖKSET JA PARANNUSEHDOTUKSET	80
10.1	EROTTIMIEN KUNNOSSAPITO.....	80
10.1.1	Erottimien huoltovälit.....	80
10.1.2	Voitelurasvat	81
10.1.3	Lämpökuvaus	81
10.1.4	Saksierottimet.....	82
10.1.5	Vianetsintätehtävät	83
10.1.6	Jännitehuolto	84
10.2	KATKAISIJOIDEN KUNNOSSAPITO	84
10.3	VIKA- JA KUNNOSSAPITOTIEDOT	85
10.3.1	Elnetin laitevikailmoitus	85
10.3.2	Huolloissa havaitut viat.....	86
10.3.3	Kunnonvalvontamittausten seuranta	87

11	YHTEENVETO	88
12	LÄHDELUETTELO.....	89
	LIITE 1: VIKOJEN JAKAUTUMINEN KOMPONENTEITTAIN.....	92
	LIITE 2: VIKAMUOTOMATRIISIT	93
	LIITE 3: VIKOJEN JAKAUTUMINEN OSAN JA HAVAINNOTAVAN MUKAAN.....	96
	LIITE 4: HUOLLOISSA KIRJATUT VIAT 1998-2006.....	98
	LIITE 5: EROTTIMIEN YLIMENORESISTANSSIMITTAUKSET.....	100
	LIITE 6: KATKAISIJOIDEN TOIMINTA-AIKAMITTAUKSET	106

KÄYTETYT SYMBOLIT JA LYHENTEET

SYMBOLIT

A	Käytettävyys
$C(t)$	Tapahtuman laskennallinen seuraus (kustannus)
C_{huolto}	Huoltokustannukset
$C_{häiriö}$	Häiriökustannukset
$C_{investointi}$	Investointikustannukset
C_{kok}	Kokonaiskustannukset
$C_{romutus}$	Romutuskustannukset
FFI	Vianetsintäväli (<u>F</u> ailure <u>F</u> inding <u>I</u> nterval)
$IMTBF$	hetkellinen keskimääräinen aika vikojen välillä <u>I</u> mmEDIATE <u>M</u> ean <u>T</u> ime <u>B</u> etween <u>F</u> ailures
JHA	Jälleenhankinta-arvo
$MTBF$	Keskimääräinen aika vikojen välillä (<u>M</u> ean <u>T</u> ime <u>B</u> etween <u>F</u> ailures)
$MTTR$	Keskimääräinen korjausaika (<u>M</u> ean <u>T</u> ime <u>t</u> o <u>R</u> epair)
$N(t)$	Laskuriprosessi (vikojen kumulatiivinen määrä)
$P(t)$	Tapahtuman todennäköisyys
$R(t)$	Riski
$ROCOF$	Absoluuttinen vikataajuus, <u>R</u> ate of <u>O</u> ccurrence of <u>F</u> ailures
t	Aika
$TJSA$	Toimittamatta jäänyt sähköenergian arvo [€]
$TJSE$	Toimittamatta jäänyt sähköenergia [MWh]
U	Epäkäytettävyys
U_D	Sallittu epäkäytettävyys
$v(t)$	Absoluuttinen vikataajuus
$\hat{v}(t)$	Absoluuttisen vikataajuuden estimaattori
$V(t)$	Vikojen lukumäärän odotusarvo

λ Vakiovikataajuus

LYHENTEET

Cigré	International Council on Large Electric Systems
DRM	Dynaaminen resistanssi mittaus
Elnet	Fingridin käyttämä ainutlaatuinen omaisuuden hallinnan, kunnossapidon, suunnittelun ja käytön tietojärjestelmä
EMV	Energiamarkkinavirasto
FG	Fingrid Oyj
GIS	Kaasueristeinen kytkinlaitos, <u>G</u> as <u>I</u> nsulated <u>S</u> witchgear
HPP	Homogeeninen Poisson-prosessi
IVS	IVO Voimansiirto
KEJO	Kemijoki Oy
Major	engl. merkittävä, käytetään kuvaamaan laitevian astetta
minor	engl. vähäinen, käytetään kuvaamaan laitevian astetta
RCM	Reliability Centred Maintenance, luotettavuuskeskeinen kunnossapito
SF ₆	Rikkiheksafluoridi, kaasukatkaisijoissa käytetty väliaine
TVS	Teollisuuden Voimansiirto Oy
UÄ	Ultraääni (-mittaus)

1 Johdanto

Usein teollisuusyrityksien kunnossapito-organisaatioissa nähdään paljon vaivaa vikatietojen keräämiseen ja taltiointiin. Tietokantoihin tai arkistoihin kerätystä vikatiedosta on kuitenkin hyvin vähän hyötyä, ellei sitä jalosteta edelleen informaatioksi. Selkeässä ja ymmärrettävässä muodossa olevaa vikainformaatiota voidaan käyttää päätöksenteon tukena myös organisaation niissä osissa, jotka eivät ole perehtyneet teknisiin yksityiskohtiin.

Suomen kantaverkossa aloitettiin 2000-luvulla luotettavuuskeskeisen kunnossapidon (RCM) soveltaminen sähköasemalaitteisiin. Tavoitteena on valita laitteille mahdollisimman optimaaliset kunnossapitotehtävät ja niiden toistovälit jatkuvan analyysin avulla. Tämä työ on osa kyseistä RCM-prosessia ja tulosten seuranta. Työssä analysoidaan verkkotietojärjestelmään noin 15 vuoden ajan tallennettuja kunnossapito- ja laitevikatietoja sekä tilastollisin menetelmin että asiantuntija-arvioin. Erityisenä kiinnostuksen kohteena on katkaisijoiden ja erottimien vikataajuuden historiallinen kehittyminen.

Tämän diplomityön tavoitteena on lisätä ymmärrystä vikojen, kunnossapidon ja iän välisestä suhteesta. Laitteen elinkaaren hallinnan kannalta on tärkeää, että verkon laitekannan nykyinen kunto tunnetaan hyvin ja tulevaisuuden kehitystä voidaan ennustaa. Työssä arvioidaan lisäksi Fingrid Oyj:n nykyistä vika- ja kunnossapitotietojen keräysprosessia ja pyritään edesauttamaan tietojen käyttöä osana kytkinlaitteiden kunnonhallintaa.

Tämä tutkimus rajattiin koskemaan kytkinlaitteita eli katkaisijoita ja erottimia, koska ne ovat lukumäärältään verkon yleisimpiä primäärilaitteita ja niillä on aktiivinen rooli verkon käytössä. Kummankin laiteryhmän oletettu teknillistaloudellinen pitoaika on 40 vuotta. Hyvin pitkät investointiajat ovat sähköverkon primäärilaitteille tyypillisiä. Tutkimalla laitteiden luotettavuutta, kuntoa ja historiatietoja voidaan muodostaa käsitys siitä, kuinka todenmukainen oletus teknisestä eliniästä on. Nykyisellä pitoajalla kytkinlaitteiden arvioitu osuus primäärilaitteiden perusparannuskustannuksista on noin kolmasosa vuoteen 2030 mennessä, joten kunnon seurannalle on myös vahvat taloudelliset perusteet.

1.1 Tutkimuskysymykset

Diplomityötä kirjoitettaessa seuraavat kysymykset ovat olleet taustalla ja toivottavasti antavat myös lukijalle punaisen langan, jota seurata:

- Ovatko erottimien ja katkaisijoiden vikataajuudet riippuvaisia laitteen iästä?
- Mitkä kunnossapitotehtävät ja -toimenpiteet ovat tehokkaita ja teknisesti tarkoituksenmukaisia?
- Voidaanko kytkinlaitteiden kunnossapidossa saavuttaa säästöjä käyttövarmuutta pienentämättä?
- Miten laitevika- ja kunnossapitotietoja voitaisiin käyttää elinkaaren hallintaan?
- Miten vika- ja kunnossapitotietojen kirjaamista ja hallintaa voidaan kehittää?

1.2 Lukijalle

Tämän diplomityön lukemiseen ei vaadita lainkaan sähköopin teoreettista hallintaa, mutta perustiedot sähkölaitostekniikasta auttavat ymmärtämään, mistä on kyse. Aiheena kunnonhallinta sivuaa hyvin montaa perinteistä insinööritiedettä kuten sähkö-, kone- ja automaatiotekniikkaa. Kunnonhallinta on silti täysin oma alansa ja sen perusperiaatteet ovat sovellettavissa tietyin edellytyksin mille tahansa tekniikan osa-alueelle rakennuksista tietotekniikkaan.

1.3 Vikoihin liittyviä käsitteitä

1.3.1 Vika ja vikaantuminen

- Vikaantuminen tarkoittaa kohteen kykenemättömyyttä täyttää siltä vaadittua toimintoa.
- Vika on kohteen tila, joka seuraa vikaantumisesta. [SFS96]

Vikaantuminen on siis tapahtuma siinä, missä vika on tila. Usein ammattikielessä vian kohde tuodaan esiin käyttämällä tarkentavaa ilmaisua kuten johtovika, laitevika tai katkaisijavika. Kunnossapidon kannalta on tärkeää erottaa, onko vika aiheutunut itse kunnossapidon kohteesta vai jostain ulkopuolisesta syystä. Kunnossapidolla ei voi ennaltaehkäistä ulkopuolisia vikoja kuten salamaiskuja tai inhimillisiä virheitä. Näihin voidaan kyllä vaikuttaa, mutta tämä tapahtuu käyttämällä erilaista suunnitteluratkaisua tai antamalla asianmukaista koulutusta henkilöstölle.

1.3.2 Käyttöhäiriö

Käyttöhäiriöllä, tai lyhyemmin häiriöllä, tarkoitetaan yhden tai useamman vian aiheuttamaa ennakkoimatonta tilannetta sähkön siirrossa. Tietyssä mielessä häiriö on voimajärjestelmän vika. Pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden yhteistyöjärjestö Nordelin määritelmiin perustuen käyttöhäiriöstä voidaan puhua, kun [Nor05, Väl07]

- Suojarele laukaisee katkaisijan
- Verkon osa joudutaan kytkemään eroon
- Katkaisija suorittaa jälleenkytkennän, joka epäonnistuu
- Sähkönsiirrossa esiintyy toimitusrajoitus

Noin 97 % kaikista Pohjoismaisista häiriöistä aiheutuu suojareleen laukaisuista. Häiriö on aina vian aiheuttama, mutta vika ei aina aiheuta häiriötä.

1.3.3 Laitevian asteet

Fingridissä käytetään Cigrén laitevikojen kaksiasteista luokittelua minor- ja Major-vikoihin. Major-viat ovat vakavia vikoja, jotka edellyttävät laitteen poiskytkentää välittömästi tai asianmukaisten toimenpiteiden aloittamista alle puolessa tunnissa. Major-viaksi lasketaan myös laitteen epäonnistuminen päätoiminnon suorittamisessa esimerkiksi kytkentätilanteessa. Minor-viat ovat lieviä vikoja, jotka eivät vaadi välittömiä toimenpiteitä. Laajimmassa merkityksessä minor-vika on mikä tahansa poikkeama toiminnosta (normaaliarvosta), jota odotetaan laitteelta. Työssä minor-viat kirjotetaan pienellä kirjaimella ja Major-viat isolla korostuksen vuoksi. Vastaavasti termit lyhennetään pienellä m- ja isolla M-kirjaimella.

1.3.4 Laitteiden luokittelu

Laiteryhmällä tarkoitetaan laitteen käyttötarkoituksen mukaista luokittelua. Laiteryhmiä ovat esimerkiksi katkaisijat, erottimet ja muuntajat.

Alalaiteryhmällä tai lajilla tarkoitetaan laiteryhmän sisäistä luokittelua. Esimerkiksi katkaisijat voidaan jakaa kaas-, vähäöljy-, paineilma- ja tyhjökatkaisijoihin.

Tyypillä tarkoitetaan valmistajan laitteelle antamaa nimeä, joka on usein kirjain tai numerosarja. Fingridissä käytetään tyypistä myös termiä lajimerkintä, joka on hieman harhaanjohtava.

Sähköverkon primääri- eli ensilaitteella tarkoitetaan laitetta, joka toimii siirtojännitetasolla. Nämä laitteet ovat siis osa primääripiiriä. Primäärilaitteiksi lasketaan katkaisijat, erottimet, tehomuuntajat,

mittamuuntajat ja kompensointilaitteet. Sekundäärilaitteella, tai yleisimmin toisiolaitteella, tarkoitetaan esimerkiksi suojarkeitä, jotka on kytketty mittamuuntajien toisiopiireihin.

1.3.5 Palvelutoimittaja

Kantaverkon suorittava kunnossapito on täysin ulkoistettu. Sekä voimajohtojen että sähköasemien peruskunnossapito kilpailutetaan alueittain viiden vuoden mittaisina sopimuskausina. Myös useat muut kuin verkko-omaisuuteen liittyvät toiminnot ovat ulkoistettuja. Yritystä, jolta FG ostaa palvelun, kutsutaan yleisesti palvelutoimittajaksi.

2 Tutkimuksen aineisto

2.1 Yleistä

Työn tärkeimpänä aineistona ovat Fingridin Elnet-tietojärjestelmään tallennetut laitevikailmoitukset ja kunnossapitotiedot. Elnet otettiin käyttöön vuonna 1994 ja vuosien 1996–2000 välisenä aikana ohjelma siirrettiin moderniin Windows-ympäristöön. Kyseessä on sisällöltään ainutlaatuinen ohjelmisto, joka on räätälöity Suomen kantaverkon omiin tarpeisiin. Elnet sisältää useita sovelluksia, joita käytetään aktiivisesti kaikissa Fingridin prosesseissa [Yli02].

Elnetiin liittyvät ohjelmamuutokset ja korjaukset ostetaan ulkopuoliselta toimittajalta. Vastuu ohjelman toiminnasta on jaettu Fingridin sisällä sovellusvastaaville, joiden tehtävänä on hallinnoida tietosisältöä ja määrittää mahdolliset kehittämistarpeet.

2.2 Laitevikojen kirjaaminen Elnetiin

Mikäli asemalaitteen toiminnassa havaitaan puutteita, siitä tehdään laitevikailmoitus Elnetin laitevika-sovellukseen. Palvelutoimittajat, joilla on rajoitetut oikeudet käyttää Elnetiä, tekevät suurimman osan vikakirjauksista kunnossapitotoimenpiteiden yhteydessä..

Laitevikailmoituksen luonti synnyttää aina myös kunnossapitotarpeen Elnetin huolto-sovellukseen, joten erityisesti ei-kiireellisten vikojen hallinnointi on yksinkertaista [Yli02].

Kuvassa 2-1 on esitetty laitevikailmoituksen ensimmäinen välilehti. Ilmoitukseen täytetään laitteen nykyinen asematunnus, laitepaikka, havaintoaika ja lämpötila. Alasvetovalikoilta tai listoilta voidaan valita

- Vioittunut osa
- Arvioitu syy
- Havaintotapa
- Ympäristöolosuhteet vian sattuessa
- Vian vaikutus
- Laitteen käytettävyys vian jälkeen
- Laitevian aste
- Korjauksen kiireellisyys
- Korjaustapa

Muut tiedot Elnet hakee automaattisesti laiterekisteristään. Toisella välilehdellä olevaan vikaselostukseen voidaan vapaasti kirjoittaa kuvaus viasta tai siihen johtaneista syistä. Monesti juuri tämä vapaamuotoinen kuvaus sisältää eniten informaatiota. Korjausselostus-välilehdelle voidaan niin ikään täyttää vapaamuotoinen kuvaus korjaustoimenpiteistä. Usein korjausselostus täydentää vikaselostusta ja antaa tarkemman kuvan sattuneesta laiteviasta.

Kuva 2-1. Elnetin laitevikailmoitus.

Tarkastus-välilehdellä Fingridin omat laiteasiantuntijat voivat antaa vialle minor- tai Majorluokituksen ja arvioida kunnossapitohenkilöstön antamien kuvausten perusteella vikamuodon tyyppin. Tarkastus-välilehti näkyy ainoastaan Fingridin omalle henkilökunnalle.

2.3 Laitevikailmoitukset

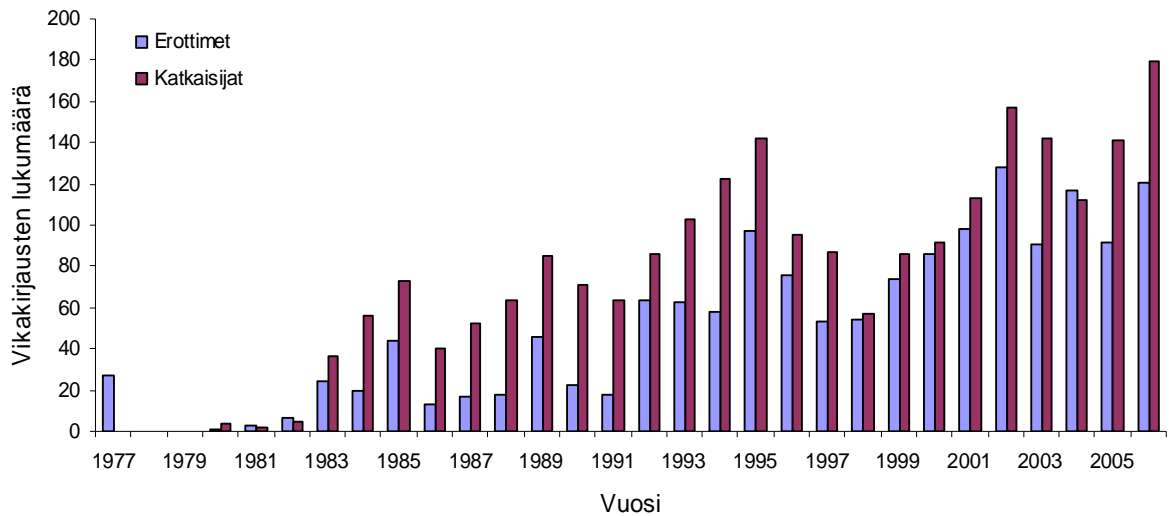
Vuoden 2007 alkuun mennessä Elnetiin on kirjattu 6000 primäärilaittevikaa, joista vanhimmat ovat vuodelta 1977. Fingrid Oyj perustettiin 1997 yhdistämällä IVO Voimansiirron (IVS) ja Teollisuuden Voimansiirron (TVS) omistamat siirtoverkot yhdeksi kantaverkkoyhtiöksi. Myöhemmin vuonna 1998 kantaverkkoon liitettiin Kemijoki Oy:n (KEJO) pohjoisia sähköasemia. TVS:n ja KEJO:n vikatietoja ennen yhdistymistä ei ole tallennettu Elnetiin. Ennen vuotta 1998 kirjatut vikailmoitukset ovat siis yksinomaan IVS:n vuosina 1992–1997 omistamasta verkosta. Tallennettujen vikojen ja häiriöiden lukumäärät on esitetty taulukossa 2-1.

Taulukko 2-1. Elnetiin kirjatut laiteviat ja häiriöt vuoden 2007 tammikuussa.

Laiteryhmä	Vikojen lukumäärä	Osuus kaikista vioista	Vika aiheuttanut häiriön	Häiriöiden osuus laitevioista	Osuus kaikista häiriöistä
Katkaisija	2284	38,0 %	78	3,4 %	27 %
Erotin	1537	25,6 %	20	1,3 %	7 %
Tehomuuntaja	791	13,2 %	46	5,8 %	16 %
Virtamuuntaja	778	13,0 %	22	2,8 %	7 %
Rinnakkaisreaktori	212	3,5 %	34	16,0 %	12 %
Jännitemuuntaja	201	3,3 %	15	7,5 %	5 %
Kondensaattoriparisto	184	3,1 %	75	40,8 %	26 %
Ylijännitesuoja	20	0,3 %	4	20,0 %	1 %
Yhteensä	6007	100 %	294		100 %

Ylivoimaisesti eniten vikoja on kirjattu kytkinlaitteille eli katkaisijoille ja erottimille. Katkaisijoiden ja erottimien yhteenlaskettu osuus kaikista laitevioista on yli 63 %, mutta laitteiden aiheuttamista häiriöistä kytkinlaitteet aiheuttavat vain noin kolmanneksen. Useimmat kytkinlaitteille kirjatut häiriöt ovat seurausta inhimillisistä virheistä. Varsinkin erottimien aiheuttamat häiriöt ovat todella harvinaisia ja niiden osuus Fingridin kaikista häiriöistä on hyvin pieni.

Kuvassa 2-2 on esitetty Elnetin erottimille ja katkaisijoille kirjattujen vikailmoitusten lukumäärä havaintovuosittain. Vanhimmat viat on syötetty rekisteriin jälkepäin. Tämä tutkimus aloitettiin tarkastamalla kaikki kytkinlaitteiden 3800 laitevikailmoitusta. Vanhat merkinnät muutettiin yhdenmukaisiksi nykyisen kirjauskäytännön kanssa. Puuttuvia kenttiä täytettiin ja mahdolliset virheet korjattiin.



Kuva 2-2. Elnettiin kirjatut erottimien ja katkaisijoiden vikailmoitukset havaintovuoden mukaan

Vikakirjausten trendi on selvästi nouseva, mikä on ainakin neljän tekijän summa

- Vikojen kirjausta on aktiivisesti kehitetty 2000-luvulla
- Erittäin vanhoja vikoja ei ole syötetty jälkikäteen tietokantaan
- Kytkinlaitteiden määrä on lisääntynyt siirtoverkon laajennusten myötä
- Laitekanta vanhenee

Tämän tutkimuksen kannalta eri vuosien tietojen eriarvoisuus aiheuttaa tilastollisessa tarkastelussa ongelman, joka on huomioitava tulkittaessa tuloksia

Kirjaukset ovat aina alttiita inhimillisille tekijöille ja siten luonteeltaan hyvin subjektiivisia. Esimerkiksi kirjaustiheys ja tarkkuus vaihtelevat yllättävänkin paljon kunnossapitoalueittain ja henkilöittäin. Palvelutoimittajan vaihtaminen saattaa siis vaikuttaa kirjausten määrään ja muotoon. Vikailmoitukset ovatkin ennen kaikkea havaintoja. Vika on saattanut olla olemassa jo pidemmän aikaa ennen kuin varsinainen havainto tehdään. Lähtötietoja on siis jatkuvasti tarkasteltava kriittisessä valossa.

2.4 Kunnossapitotiedot

Laitevikatietojen rinnalla voidaan hyödyntää kunnossapitotoimenpiteiden yhteydessä kerättyä mitaustietoa. Mittaukset ovat vähemmän alttiita tulkinnoille ja suoria lukuarvoja on helpompi käsitellä analyttisesti. Tämän työn kannalta kiinnostavia tuloksia ovat lähinnä ylimenoresistanssin mittaukset, katkaisijoiden toimintakerrat ja -ajat, kaasuanalyysit sekä vapaamuotoiset merkinnät, joita on kirjattu huoltojen yhteydessä.

2.5 Laitemanuaalit

Vuonna 2005 tallennettiin sähköasemalaitteiden käyttö- ja kunnossapito-ohjeet sähköisessä muodossa Fingridin dokumenttienhallintaympäristö Project Wiseen, josta ne ovat helposti luettavissa. Osassa uudemmissa laitemanuaaleista on hyvinkin tarkat ohjeet huoltojen ajoittamisesta ja suositelluista toimenpiteistä. Fingridin nykyinen kunnossapitopolitiikka ei ole perustunut suoraan laitevalmistajien ohjeisiin vaan myös omaan käyttökokemukseen. Kantaverkossa käytetyt huoltovälit ovat perinteisesti olleet valmistajan suositusarvoja pidempiä, mutta nyt asetelma näyttää kääntyneen uusimpien katkaisijoiden kohdalla. Eroja näyttäisi löytyvän myös eri valmistajien suositusten välillä.

3 Luotettavuuskeskeinen kunnossapito - RCM

3.1 Yleistä

Reliability Centred Maintenance (RCM) eli suomeksi luotettavuuskeskeinen kunnossapito otti ensiaskeleensa Yhdysvaltojen lentokoneiteollisuudessa 1960-luvun lopulla, kun valmistajat Boeing ja Lockheed esittelivät suurelle yleisölle ensimmäiset laajarunkokoneet. Aikaisemmin käytetyt erittäin laajamittaiset huolto-ohjelmat, joissa suoritettiin ennakoivaa huoltoa käytännössä jokaiselle lentokoneen osalle, koettiin aivan liian raskaiksi ja kustannustehottomiksi. Hyvin monimutkaisiksi käyneille lentokoneille tuli välttämättömäksi kehittää huoltopolitiikka, joka takaisi riittävän luotettavuuden ja jota olisi mahdollista toteuttaa kohtuullisin resurssein. Kunnossapidon painopiste siirtyi yksittäisten laitteiden tarkastelusta järjestelmätasolle. Ymmärrettiin, että erillisten osien kunnan tasoa tärkeämpää oli, että järjestelmät kokonaisuudessaan toimivat ja toteuttivat määriteltyä tehtäväänsä.

Richard B. Jonesin määritelmää mukaillen RCM-analyysiä voisi luonnehtia seuraavasti [Jon95]:

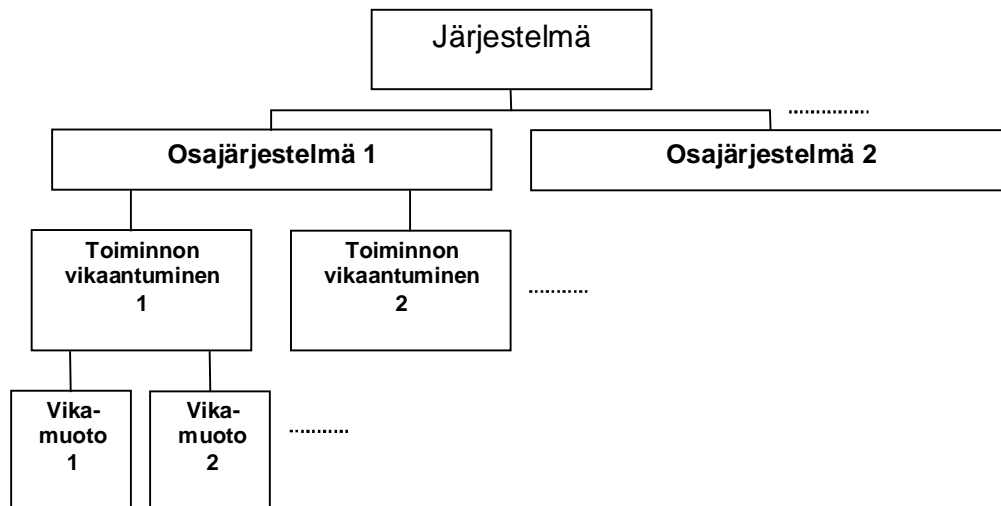
RCM on menetelmä oikean kunnossapito-ohjelman laatimiseen ja kehittämiseen turvallisuus-, luotettavuus- ja kustannuslähtökohdista. RCM-analyysissä toimintoja, vikaantumisia ja vikojen ennalta ehkäisemistä tarkastellaan järjestelmän näkökulmasta.

RCM on vuosien varrella löytänyt tiensä monille eri aloille sotateollisuudesta ydinvoimalaitoksiin. Siirtoverkoissa luotettavuuskeskeistä kunnossapitoa on alettu käyttämään vasta 1990-luvulla, joten sovellusalana se on verrattain nuori. Aluksi analyysiä tehtiin lähinnä kvalitatiivisella tasolla, mutta laskennallinen luotettavuustekniikka, riskianalyysi ja tilastollinen mallintaminen tulivat mukaan hyvin nopeasti.

Erityisen houkuttelevaksi RCM:n tekevät sen ansiot sekä kustannustehokkuuden että käytettävyyden parantamisessa. RCM ei ole joukko matemaattisia malleja tai totuuksia, joiden avulla saataisiin absoluuttisia vastauksia kysymyksiin kuten, "Mikä on laitteen X optimaalinen huoltoväli?" Kyseessä on enemmänkin kokoelma analyttisiä periaatteita, joita voidaan joustavasti soveltaa alaan kuin alaan ja käyttää kunnossapitoa koskevan päätöksenteon tukena. Erään määritelmän mukaan RCM on hyvin organisoitua maalaisjärjen käyttöä. Viimekädessä analyysin tulee vastata kysymykseen "mitä pitäisi tehdä?" [Jon95, Yli02, Rin99]

3.2 RCM-analyysin kulku

Luotettavuuskeskeisen kunnossapidon ajatuksena ei ole ennalta ehkäistä vikoja, vaan estää vikojen vaikutukset [Rin99]. Jotta vikaantumisprosessit voitaisiin ymmärtää, on analysoitava järjestelmä järkevää rajata toiminnallisiin ja mieluiten helposti hahmotettaviin kokonaisuuksiin. Kuvassa 3-1 on esitetty RCM-analyysin hierarkia [Jon95].



Kuva 3-1 RCM-analyysin hierarkia

Varsinainen analyysiprosessi vaihtelee hiukan eri lähteiden mukaan, mutta pitää sisällään seuraavat ydinvaiheet:

1. Järjestelmän ja osajärjestelmien rajaaminen
2. Osajärjestelmien toimintojen ja niiden vikaantumisten määrittely
3. Vikamuotojen määrittely jokaiselle toiminnon vikaantumiselle
4. Vikojen seurausten arvioiminen
5. Laskennallinen luotettavuusanalyysi
6. Kunnossapitotehtävien ja toistovälien määrääminen eri vikamuodoille
7. Tulosten seuranta ja toiminnan kehittäminen

Listaan voitaisiin lisätä myös nolla-askel, jossa järjestelmästä ja sen osista hankitaan kaikki mahdollinen informaatio kuten ohjekirjat, vikailmoitukset ja muut aiheelliset raportit. Näin voidaan luottaa siihen, että päätökset perustuvat parhaalle mahdolliselle tietämykselle.

Askeleet 3 ja 4 eli vika- ja vaikutusanalyysi (FMEA eli Failure Modes and Effects Analysis) voidaan kätevästi tehdä taulukkolaskentaohjelmalla kuten MS Excel. Räättälöidyille ohjelmistoille on harvoin todellista tarvetta, ellei tarkasteltava järjestelmä ole itsessään hyvin monimutkainen.

Seitsemäs askel edustaa RCM-prosessin jatkuvuutta ja pitää sisällään tulosten seurannan ja tarvittaessa laadittujen kunnossapitosuunnitelmien tarkistamisen ja kehittämisen. Tämä diplomityö keskittyy erityisesti vaiheisiin viisi ja seitsemän.

3.2.1 Järjestelmä ja osajärjestelmä

RCM-analyysissä hierarkiassa ylimpänä on järjestelmä (system), jonka toiminnasta ollaan kiinnostuneita. Järjestelmät voivat tietysti olla osa suurempaa kokonaisuutta. Käytännön analyysin kannalta järjestelmätaso on usein riittävä, mutta hyvin monimutkaisissa laitoksissa voi olla perusteltua käyttää useampaa järjestelmäporrasta. Nämä kuitenkin suhtautuvat toisiinsa aivan kuten järjestelmät ja osajärjestelmät.

Järjestelmää pienempi kokonaisuus on osajärjestelmä (sub-system), jonka määrittelylle asetetaan seuraavat vaatimukset [Jon95]:

- Osajärjestelmä toteuttaa järjestelmän kannalta yhden tai useamman toiminnon
- Osajärjestelmällä on fyysiset rajat ja hyvin määritellyt toiminnalliset rajapinnat muiden osajärjestelmien kanssa
- Osajärjestelmien rajauksessa ei saa esiintyä päällekkäisyyttä
- Osajärjestelmien liitto on järjestelmä itse

Osajärjestelmät voivat olla sarjassa tai rinnan. Mikäli osajärjestelmät ovat sarjassa, vikaantuminen yhdessäkin osassa johtaa koko sarjassa olevan ketjun toimimattomuuteen. Tämä vastaa loogista "tai" -operaattoria. Rinnakkaisessa lohossa vasta kaikkien osien vikaantuminen johtaa toimimattomuuteen, eli järjestelmällä on redundanssia. Rinnakkaisuus vastaa siis loogista "ja" -operaattoria. Sähköisissä piireissä vikaantumislogiikka on helppo määrittää, mutta esimerkiksi mekaanisilla rakenteilla se ei välttämättä ole itsestään selvää.

3.2.2 Toiminto ja toiminnon vikaantuminen

Kunnossapidon periaatteellinen tarkoitus on ylläpitää järjestelmän toimintoja. RCM-analyysissä on siksi määriteltävä, mitä toimintoja laitteelta vaaditaan. Tarvittaessa toiminnot (functions) voidaan jakaa kahteen luokkaan jotka ovat:

- Primääri- eli päätoiminnot (primary functions)
- Sekundääri- eli sivutoiminnot (secondary functions)

Päätoiminnot ovat yleensä kohtuullisen selviä ja läpinäkyviä. Ne ovat perimmäisesti niitä syitä, joilla perustellaan laitteen olemassaolo. Esimerkiksi yksi katkaisijan päätehtävistä on aivan ilmeisesti "katkaista virtapiiri, kun se saa laukaisukäskyn". Päätoiminnon tunnistaakin monesti laitteen nimestä.

Sekundääritoiminnot eivät aina ole yhtä ilmeisiä. SF₆-katkaisijalle sivutoiminto voisi olla esimerkiksi kaasutilan tiiveyden säilyttäminen tai tilatiedon välittäminen käytönvalvontajärjestelmään. Sekundääritoiminnoista vastaa usein vain yksi osajärjestelmä.

Kun laite ei kykene suoriutumaan siltä vaaditulta toiminnolta, puhutaan toiminnon vikaantumisesta (functional failure). Toimintojen vikaantumisia voi olla määrällisesti enemmän kuin toimintoja, koska kyseessä ei välttämättä ole joko/tai-tilanne. Katkaisija voi esimerkiksi epäonnistua päätoiminnossaan "katkaista virtapiiri" useallakin eri tavalla: katkaisutapahtuma voi olla vajaanapainen (epäsymmetrinen), liian hidas tai epäonnistua täysin.

3.2.3 Vikamuoto

Vikamuodolla (failure mode) tarkoitetaan sitä tapahtumaa tai tapahtumien ketjua, joka todennäköisesti aiheuttaa vikaantumisen [Mou97]. Vikamuotoa ei kannata määrittää liian tarkasti, vaan taso kannattaa pitää käytännönläheisenä, koska juuri vikamuotoihin pyritään vaikuttamaan kunnossapidon toimenpiteillä. Ei ole tarkoituksenmukaista jäljittää vikaumisprosessia fysikaaliselle tasolle, vaikka näin teoriassa voitaisiinkin tehdä. Vikamuodoiksi ei myöskään kannata luetella sellaisia tapahtumia, joita esiintyy äärimmäisen harvoin. Se, mikä on käytännönläheinen taso, riippuu pitkälti RCM:n soveltamisen kohteena olevasta järjestelmästä.

Otetaan esimerkiksi ilmaeristeinen erotin, jonka voimansiirto (osajärjestelmä) on jäykistynyt ja erotin epäonnistuu tehtävässään "katkaista tyhjäkäyvä piiri". "Jäykistyminen" itsessään ei ole kovinkaan informatiivinen vikamuoto, joten sen käyttöä kannattaa välttää. Sen sijaan esimerkiksi "hapettuma" tai "rasvan puute" kertovat jo huomattavasti enemmän vikaantumisen syistä. Näin huoltotoimenpiteetkin on helpompi kohdistaa. Epämääräisiä ja yleisiä ilmaisuja ei pitäisi käyttää vikamuotojen kuvauksissa.

Vaikka fysikaaliselle tasolle ei kannata mennä vikamuotojen listauksessa, joskus on syytä pureutua tarkemmin vian syntymekanismeihin (failure mechanism). Edellisen esimerkin tilanteessa perimmäisenä syynä olisi saattanut olla voitelurasvan huonot ominaisuudet. Vikamuotojen esiintymistajuus toimii kuitenkin hyvänä indikaattorina, milloin syvempi tarkastelu saattaisi olla tarpeen [Mou97, Yli02].

3.2.4 Vikojen seurausten arviointi

Vikojen ennaltaehkäisyyn perimmäisenä tavoitteena on estää vikojen synnyttämät haitalliset seuraukset, jotka voivat vaikuttaa ylempään tasoon tai järjestelmän ulkopuoliseen maailmaan.

Viat voidaan seurausten perusteella jakaa kolmeen luokkaan vakavuusjärjestyksessä [Mou97, Yli02]:

- Vika vaikuttaa henkilöturvallisuuteen tai sillä on ympäristöllisiä seuraamuksia
- Vika vaikuttaa käyttötilanteeseen tai rajoittaa siirtoa (tai tuotantoa yleisemmässä merkityksessä)
- Vika ei vaikuta käyttötilanteeseen

Vialla on vaikutuksia henkilöturvallisuuteen, jos sen voidaan katsoa aiheuttavan vaaratilanteen tai se on jo aiheuttanut henkilövahingon omille työntekijöille tai sivullisille. Vialla voidaan katsoa olevan ympäristöseuraamuksia, jos se tapahtuessaan rikkoo ympäristöön liittyvää standardia tai lakia.

Vika voi vaikuttaa käyttötilanteeseen siten, että joko järjestelmän siirtokapasiteetti tai redundanssi pienenee vian ajaksi. Jos järjestelmän kaikki redundanssi on jo käytetty (tai sitä ei ollut), viasta aiheutuu tuotannollisia seuraamuksia, jolloin kustannuksiksi joudutaan kirjaamaan korjauksen lisäksi menetetty siirto. Pahimmassa tapauksessa sähkönsiirtoverkon vika voi aiheuttaa asiakkaan prosessin alasajon tai suurhäiriön, jolloin keskeytysaika voi olla huomattavasti yksittäistä verkon vika-aikaa pidempi.

Mikäli vika ei vaikuta välittömästi käyttöön, siitä aiheutuu pelkästään korjauskustannukset.

Myös laitteen sijainnilla voi olla suurikin merkitys vaikutusten mittakaavaan. Täysin samanlaisten komponenttien vikaantuminen voi aiheuttaa eri paikoissa hyvin erilaisia seurauksia. Siksi onkin hyvä ottaa huomioon laitteen sijainnista tai roolista riippuva tärkeys [Rin99]. Myös hetkellinen siirtotilanne vaikuttaa yhtäläillä seurausten vakavuuteen, mutta tämä on vaikeampi huomioida.

3.2.5 Laite- ja järjestelmäsuuntautunut RCM

RCM-analyysiä on tehty sähköverkoissa sekä järjestelmä- että laitesuuntautuneesti. Järjestelmäsuuntautunut lähestymistapa analysoi laitteita osana järjestelmää, kun taas laitesuuntautuneessa lähestymistavassa laitteelle itselleen annetaan järjestelmän status. Järjestelmäsuuntautuneessa lähestymistavassa rajataan jokin verkon osa esimerkiksi voimajohto tai sähköasema, joiden komponenteille (osajärjestelmille) määritetään sama päätoiminto kuten "sähkön häiriötön syöttö". Järjestelmäsuuntautunut näkökulma on kuitenkin osoittautunut ainakin siirtoverkoissa liian raskaaksi

toteuttaa, sillä se vaatii yhdistettyä asiantuntemusta kunnossapito-, suojaus- ja käyttöorganisaatioilta. Lisäksi tarkastelun taso jää helposti karkeaksi vikamuotojen suhteen. Laitesuuntautunut RCM-analyysi on kevyempi toteuttaa ja se tuottaa tarkempaa informaatiota kunnossapidon näkökulmasta, mutta vaikutukset järjestelmälle jäävät analysoimatta. Se mahdollistaa myös tyyppikohtaisten erojen analysoinnin.

Järjestelmänäkökulma voidaan laitetasolla kuitenkin sisällyttää tarkasteluun, arvioimalla vikojen vaikutusta ympäröivään verkkoon ja ottamalla huomioon laitteen kriittisyys verkon kannalta. Tosin kantaverkon kytkentä- ja siirtotilanteet vaihtelevat, minkä seurauksena tärkeysluokitukset ovat vaikeita määrittää. Tämäkin seikka tietysti puhuu laitesuuntautuneen näkökulman puolesta. Näistä syistä Fingridissä RCM-analyysit on toteutettu laitetasolla [Yli02].

3.3 Kunnonhallinta

3.3.1 Yleistä

Kunnossapidon tehtävänä on ylläpitää järjestelmän luotettavuutta riittävällä tasolla ja estää vikaantumisten aiheuttamia vakavia seurauksia. Vikojen määrä halutaan pitää kurissa, mutta ei millä hinnalla hyvänsä.

Kunnossapidon terminologiassa kunnonhallinta (maintenance management) on hierarkiassa korkeimmalla. Se sisältää periaatteet, joiden mukaan kunnossapitoa yrityksessä toteutetaan. Kunnonhallintapolitiikka, kuten yrityksen strategiakin, muotoutuu sekä operatiivisten valintojen että aktiivisen ohjauksen summana.

Kunnossapitotehtävä (maintenance task) on linjaus siitä, kuinka aktiivisesti vikaantumiseen pyritään vaikuttamaan, jos lainkaan. Kunnossapito-ohjelma (maintenance program) on taas jollekin järjestelmälle tai komponentille laadittu suunnitelma, joka pitää sisällään noudatettavat kunnossapitotehtävät ja niiden toistovälit. Sanaa huolto (service) käytetään usein synonyymisenä kunnossapidolle, mutta tässä yhteydessä sillä tarkoitetaan konkreettista kunnossapitotoimenpidettä.

3.3.2 Kunnossapitotehtävät

Kunnossapitotehtävät (maintenance tasks) voidaan jakaa kahteen pääryhmään

- Ennakoiva kunnossapito (Preventive Maintenance, PM)
- Korjaava kunnossapito (Corrective Maintenance, CM)

Ennakoivaa kunnossapitoa tehdään, jotta yllättäviltä vikakorjauksilta vältyttäisiin. Korjaavan kunnossapidon määrää pyritään siis tavallisesti minimoimaan, mutta ei välttämättä lisäämällä ennakoivia kunnossapitotoimenpiteitä. Pahimmassa tapauksessa ennakoivan kunnossapidon lisäämisestä seuraa niin sanotun toissijaisen huollon kasvu ja järjestelmän luotettavuuden heikkeneminen. Toissijaisella huollolla tarkoitetaan tässä yhteydessä huoltotoimenpiteitä, joita joudutaan suorittamaan aikaisempien huoltojen aiheuttamien vikojen takia.

Kunnossapitotehtävät voidaan jaotella vielä tarkemmin kuuteen luokkaan [Goo00]

- Jatkuva-aikainen kunnonvalvonta (on-line condition monitoring)
- Jaksollinen kunnonvalvonta (Periodic condition monitoring)
- Jaksollinen ennakoiva huolto (PM on fixed interval)
- Vian etsintä (Failure Finding)
- Ei säännöllistä huoltoa (Run-to-Failure)
- Uudelleensuunnittelu (Redesign)

Jatkuva-aikaisessa kunnonvalvonnassa laitteen tai järjestelmän kuntoa tarkkaillaan jatkuvasti ja huoltotoimenpiteitä suoritetaan heti, kun on syytä epäillä vikaantumista. Mahdollisuudet jatkuva-aikaiseen kunnonvalvontaan ovat nykyisin tiedonsiirtoyhteyksien myötä hyvät. Silti jatkuva-aikainen kunnonvalvonta katsotaan aiheelliseksi lähinnä arvokkaimmille verkon komponenteille kuten muuntajille ja katkaisijoille. Esimerkiksi jatkuvasti mittaavat kaasuanalysointorit ovat Fingridin suurmuuntajilla edullinen ja tehokas apu orastavien vikojen tunnistamiseen. Jatkuva-aikaiseksi kunnonvalvonnaksi voidaan katsoa myös laitteiden käytönvalvontajärjestelmään lähettämät merkinnot ja hälytykset.

Jaksollisessa kunnonvalvonnassa suoritetaan säännöllisiä tarkastuksia, joissa arvioidaan laitteen kunto. Huoltotoimenpiteitä kuitenkin suoritetaan ainoastaan, mikäli niihin löytyy aiheutta. Tähän ryhmään lasketaan esimerkiksi säännölliset mittaushuollot.

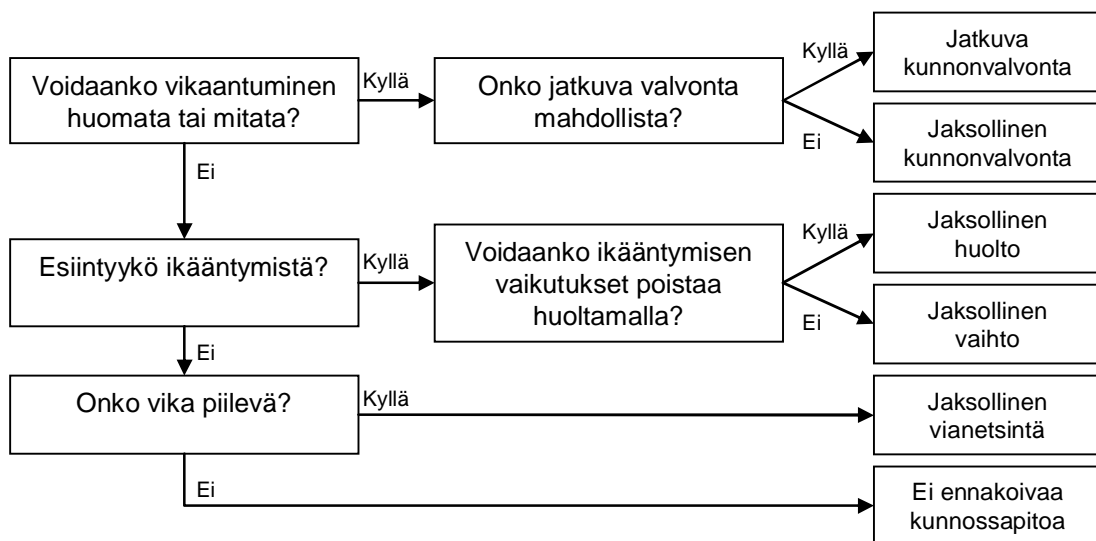
Jaksollisella ennakoivalla huollolla tarkoitetaan puolestaan säännöllistä aika- tai toimintakertapeusteista toimenpidettä, joka suoritetaan komponentin kunnosta riippumatta. Kyseessä voi olla myös korvaustoimenpide, jossa vanha osa vaihdetaan uuteen.

Vian etsintää käytetään, kun halutaan löytää piileviä vikoja. Piilevä tarkoittaa tässä yhteydessä, että vika ei tule ilmi normaalikäytössä. Käytännössä laitetta on ohjattava, jotta mahdollinen käyttöön vaikuttava vika löydetään. Luonteeltaan nämä testit ovat toimii/ei toimi -tyyppisiä.

Ei ole tavatonta, että komponentille ei määritetä säännöllistä huoltoa lainkaan. Komponenttia käytetään niin kauan kuin se kestää, jonka jälkeen se joko vaihdetaan uuteen tai korjataan. Perusteluina tälle voi olla esimerkiksi yksi tai useampi seuraavista

- Komponentin vikaantuminen ei aiheuta merkittävää haittaa
- Komponentin taloudellinen arvo on pieni huoltokustannuksiin nähden
- Ennakoiva kunnossapito alentaa käytettävyyttä liikaa
- Ennakoiva kunnossapito lisää vikojen määrää (lisää toissijaista huoltoa)
- Vikataajuus on vakio eli viat ovat niin satunnaisia, ettei ennakoivilla huoltotoimenpiteillä saavuteta etua (tällä on taas taipumusta johtaa edelliseen)
- Aika potentiaalisesta viasta varsinaiseen vikaantumiseen on liian lyhyt tai sitä ei voida havaita

Kuvassa 3-2 on esitetty päätöskaavio, jolla voidaan määrätä vialle kunnossapitotehtävä [R&V98]. Näin pelkistetty päätöslögiikka ei kuitenkaan voi sisältää kaikkia mahdollisia tapauksia. Todellisuudessa kunnossapitotehtävästä päättäminen on huomattavasti moniulotteisempaa.



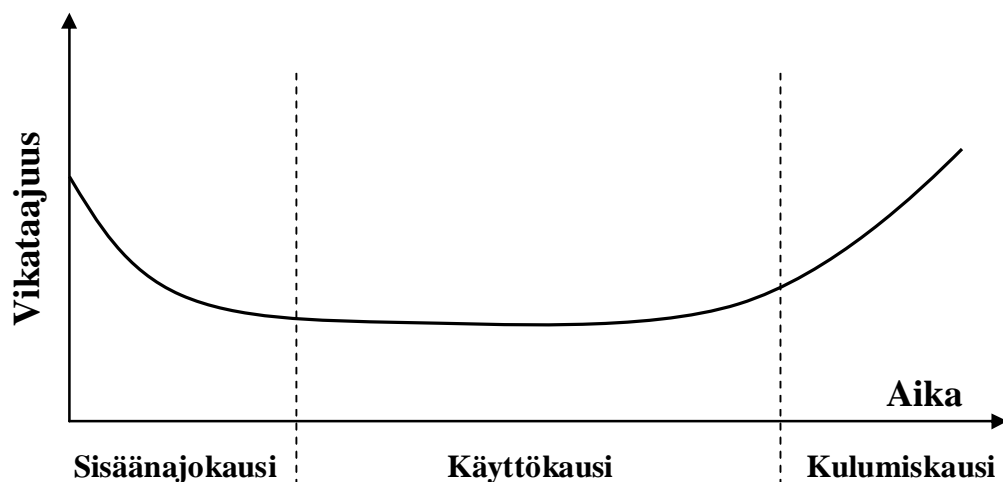
Kuva 3-2. Yksinkertainen päätöskaavio kunnossapitotehtävän valintaa varten [R&V98].

Uudelleensuunnittelu tulee kyseeseen, kun mikään aikaisemmin mainituista kunnossapitotehtävistä ei takaa hyväksyttävää luotettavuutta. Uudelleensuunnittelua ei kuitenkaan pidä ymmärtää liian kirjaimellisesti. Se voi tarkoittaa esimerkiksi korvaavan järjestelmän tai komponentin hankkimista toiselta valmistajalta, joka on käyttänyt erilaista ja paremmaksi oletettua suunnitteluratkaisua [Jon95, Mou97].

3.3.3 Vikaantumiskäyrät

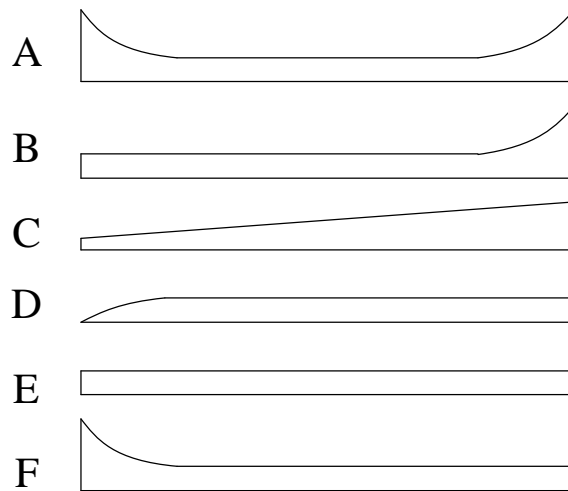
Vikaantumisen aika- tai toimintaperusteista riippuvuutta voidaan tarkastella vikaantumiskäyrillä. Vikaantumiskäyttötymisen tunteminen on ensiarvoisen tärkeää, jotta vikamuodolle voidaan valita oikea kunnossapitotehtävä ja toistoväli.

Kunnossapidon teorioissa oletettiin pitkään, että komponenttien vikaantuminen noudattaa ns. kylpyammekäyrää. Kyseinen käyrä koostuu kolmesta osasta: laskevasta sisäänajokaudesta, tasaisesta käyttökaudesta ja nousevasta kulumiskaudesta. Sisäänajokauden keskimääräistä korkeampaa vikataajuutta perustellaan valmistusvioilla ja uuden tekniikan lastentaudeilla, jotka ilmenevät hyvin varhaisessa vaiheessa. Käyttökaudella vikataajuus on likimain vakio ja viat ilmenevät siis hyvin satunnaisesti. Elinkaaren lopulla ikääntymismekanismit alkavat kuluttaa komponenttia ja vikaantumisen todennäköisyys kasvaa kiihtyvästi.



Kuva 3-3. Vikataajuuden perinteinen kylpyammekäyrä

Kunnossapitokohteiden vikaantumiskäyrien on kuitenkin joissain tapauksissa todettu poikkeavan varsin teoreettisesta kylpyammekäyrästä. Lentokoneteollisuudessa suoritetuissa tutkimuksissa havaittiin komponenttien noudattavan pääsääntöisesti kuudenlaista vikaantumiskäyrää [Mou97], joiden profiilit on esitetty kuvassa 3-4.



Kuva 3-4. Kuusi erilaista vikaantumiskäyrää [Mou97]

Käyrillä A, B ja C ikääntymismekanismit, kuten mekaaninen kuluminen ja korrosio nostavat laitteen vikataajuutta elinkaaren loppupuolella. Sen sijaan D-, E- ja F-käyrillä ikääntymisellä ei ole havaittavaa vaikutusta laitteen vikataajuuteen.

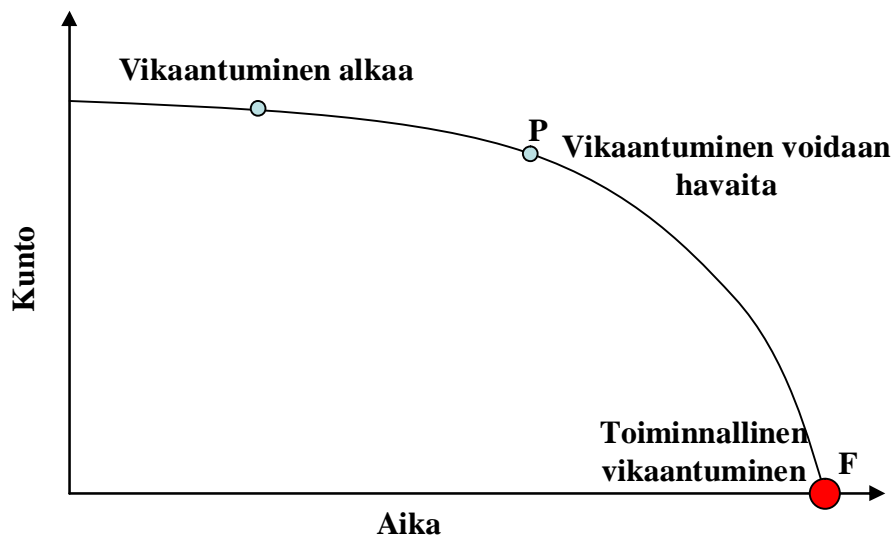
Sekä käyrillä A että F esiintyy merkittävä määrä sisäänajokauden vikoja, joita ovat aiheuttaneet esimerkiksi

- Huono suunnittelu
- Huono laatu
- Virheellinen asennus
- Virheellinen käyttö
- Tarpeeton tai liiallinen huolto

Käyrän C vikataajuus kasvaa lineaarisesti, joten kohtaa, jossa kuluminen varsinaisesti alkaa ei ole mahdollista määrittää. C-tyyppin käyrät liittyvät usein mekaaniseen väsymiseen tai esimerkiksi generaattorikäymitysten eristysten rappeutumiseen. D-käyrän komponentit ovat elinkaaren alussa hyvin toimintavarmoja, mutta altistuvat nopeasti satunnaisille vioille. Käyrä E puolestaan edustaa vakiovikataajuutta, jolloin vikojen esiintyminen on täysin satunnaista läpi komponentin elinkaaren.

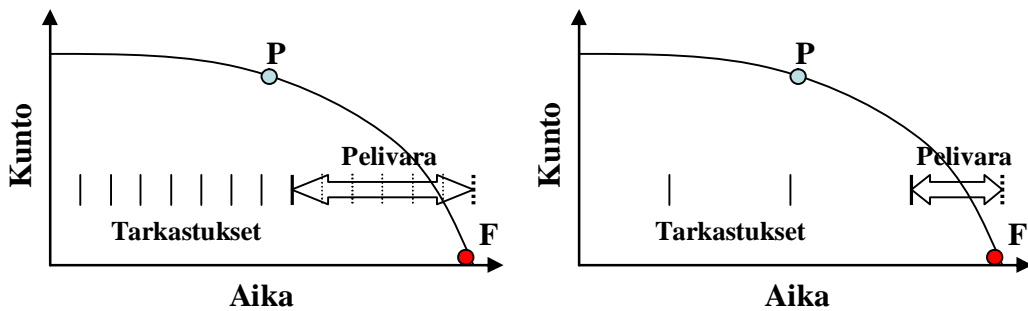
3.3.4 Vian kehittyminen

Vikaantuminen ei normaalisti tapahdu spontaanisti, vaan merkkejä potentiaalisesta viasta voidaan havaita jo aikaisemmin. Kuvassa 3-5 esitetyllä P-F (Potential Failure to Failure) diagrammilla voidaan kuvata yksittäisen vikaantumisen kehittymistä toiminnalliseksi viaksi [Mou97].



Kuva 3-5. Vikaantumisen kehitys: P-F käyrä.

Ennakoivaa kunnossapitoa ei kannata toteuttaa, mikäli vian aikaisimmasta mahdollisesta havaitsemispisteestä P toiminnalliseen vikaantumiseen F on liian lyhyt. Jos kuitenkin aikaväli P-F on riittävän pitkä ja säännöllinen, voidaan kunnonvalvonnalla ennaltaehkäistä vikojen syntymistä. Kunnonvalvontatehtävien toistovälin pitää luonnollisesti olla lyhyempi kuin P-F väli tai muuten kunnossapito ei kykene puuttumaan riittävän tehokkaasti vikaantumiseen. Kuvassa 3-6 on havainnollistettu tarkastusvälin vaikutusta pelivaraan.



Kuva 3-6. P-F käyrä ja tarkastusvälit

Pelivara on se aika, joka vähintään jää kunnossapidon käytettäväksi tarpeellisten toimenpiteiden suunnitteluun ja toteutukseen. Sähköverkon laitteiden osalta se tarkoittaisi siis käytön keskeytyksen ja huollon tilaamista. Osa katkaisijoiden ja erottimien vikamuodoista ovat sellaisia, että niitä on mahdollista seurata kunnonvalvonnalla eli P-F väli on riittävän pitkä. Tällaisia vikamuotoja ovat esimerkiksi ylimenoresistanssin kasvu, väliaineen vuodot, katkaisijoiden sallittujen toiminta-aikojen ylitys ja eristimien haurastuminen (ultraäänimittaukset).

3.4 Kantaverkon kytkinlaitteiden kunnossapitotehtävät

3.4.1 Asematarkastukset

Asematarkastukset ovat visuaalisia tarkastuksia, joita suoritetaan asemille 3–5 kertaa vuodessa. Perustarkastuksia suoritetaan 1–3 kertaa vuodessa ja niiden määrä riippuu aseman tärkeydestä ja koosta. Lisäksi kaikille asemille tehdään syyskuussa laajempi primäärilaitteisiin kohdistuva syys-tarkastus ja marras-joulukuussa talvitarkastus, jossa asemarakennuksen kuntoon kiinnitetään enemmän huomiota.

Kytkinlaitteet ja niiden tukieristimet tarkastetaan silmämääräisesti. Maasta mahdollisesti löytyneiden eristinpalasten alkuperä selvitetään. Katkaisijoiden ohjaimet tarkistetaan myös öljyvuotojen varalta. Kytkinlaitteiden mahdollisesti palaneet lämmitysvastukset vaihdetaan [FG51005].

3.4.2 Huollot

Kytkinlaitteet huolletaan säännöllisin aikavälein. Erottimien huoltoväli on pääsääntöisesti kahdeksan vuotta, mutta joillakin vanhemmilla tyypeillä kuusi tai neljä. Huollossa erottimien virtatiet, voimansiirto ja ohjain huolletaan sekä toiminta testataan. Liikkuvat osat puhdistetaan ja rasvataan sekä säädetään kohdalleen. Kuluneet osat pyritään vaihtamaan uusiin. Ylimenoresistanssi mitataan sekä ennen että jälkeen huollon. Mikäli resistanssin ohjearvot ylittyvät, vikakohta yritetään paikallistaa mittaamalla osissa. Erottimen huoltoon kuluu aikaa keskimäärin noin yhden henkilötyöpäivän verran [FG52105].

Erotin voidaan huoltaa myös jännitteisenä, jolloin koskettimet rasvataan eristinsauvan avulla. Eristysvälin takia jännitehuolto on mielekästä vain 110 kV erottimille. Suuremmilla jännitteillä sauvan pituus tekisi työstä hankalaa. Jännitehuollot on kantaverkossa lopetettu toistaiseksi kustannussyistä.

Vähäöljykatkaisijoille suoritetaan täyshuolto 12–18 vuoden välein ja diagnostiset mittaushuollot 2–7 vuoden välein. Täyshuolloissa katkaisupäät avataan ja koskettimet huolletaan. Kaasukatkaisijoille ei tehdä lainkaan katkaisupäätä avaavaa huoltoa, vaan niille suoritetaan ainoastaan mittaushuoltoja kahdeksan vuoden välein. Mittaushuolloissa tarkastetaan ohjaimet ja korjataan löydetyt puutteet sekä suoritetaan toimintakokeet. Lisäksi kaasun kosteus ja SF₆-pitoisuus mitataan kaasuanalysaattorilla. Koskettimien kunto arvioidaan ylimenoresistanssimittausten avulla [FG52104].

3.4.3 Lämpökuvaus

Lämpökuvaus suoritetaan sähköasemilla kerran vuodessa. Erottimista kuvataan liittimet ja kosketinvarret sekä katkaisijoilla liittimet ja katkaisupäät. Kuumien pisteiden lisäksi myös vaiheiden

välisiin lämpötilaeroihin kiinnitetään huomiota. Yli viiden asteen lämpenemästä tehdään Elnetiin vikailmoitus. Suosituksena on, että 5–10 °C lämpenemä hoidetaan seuraavassa huollossa, 10–35 °C lämpenemä seuraavassa keskeytyksessä ja yli 35 °C lämpenemä mahdollisimman nopeasti. Lämpökuvauksen tulokset ovat riippuvaisia kuormituksesta ja kuvaajasta. Silti lämpökuvauksella voidaan huomata virtateiden piileviä vikoja ja puuttua niihin ajoissa. Lämpökuvauksen suurin etu on, että se ei vaadi keskeytystä [FG51006].

3.4.4 Ultraäänimittaus

Ultraäänimittaus (UÄ) suoritetaan nykyisten ohjeiden mukaan noin 15 vuotta vanhoille tukieristimille tai sellaisille eristintyypeille, joilla on todettu olevan ongelmia. UÄ-mittaus paljastaa tehokkaasti rakenteelliset viat, joita ei silmin pystytä havaitsemaan. Mittaustulokset jaetaan neljään vika- ja toimenpideluokkaan. Ensimmäisessä luokassa vikakaikuja ei näy ja eristin on siis kunnossa. Uusi mittaus suoritetaan oletusarvallisesti 15 vuoden kuluttua. Toisen luokan mittaustuloksessa esiintyy vikakaikuja, joiden amplitudi on kuitenkin pienempi kuin referenssikaiku. Tällöin mittaus uusitaan 3-5 vuoden kuluttua. Jos tulos on sama, toimitaan kuten erotin olisi luokassa I, muutoin eristin vaihdetaan. Kolmannen luokan vikakaiut ovat referenssikaikua suurempia eikä kulmakaikua näy. Neljännessä luokassa eristin on ulkoisesti selvästi säröytynyt. Sekä III- että IV-luokassa eristin on vaihdettava ensi tilassa. UÄ-mittauksia varten erottimen on nykyään oltava jännitteetön, mutta uusia jännitteellisen mittaamisen mahdollistavia menetelmiä tutkitaan [FG51008].

3.5 Kunnossapitotehtävien kohdentaminen

Kunnossapitoa voi ja kannattaa kohdentaa eri kriteerien perusteella. Vaakakupissa painavat toisaalta kunnonhallinnan selvyys ja toisaalta kaiken turhan kunnossapidon minimointi. Jos jokaisella laitteella on yksilöllinen kunnossapito-ohjelma, tulee kunnonhallinnasta nopeasti hyvin raskasta toteuttaa. Toisaalta eri laitteiden erot huollon tarpeessa on järkevää ottaa huomioon. Kunnossapitoa voidaan priorisoida esimerkiksi

- Laiteryhmän
- Tyypin
- Iän
- Toimintakertojen
- Vikataajuuden
- Tärkeyden tai
- Tilaisuuden

mukaan. Yksinkertaisin mahdollinen kunnossapito-ohjelma käsittelee kaikkia saman ryhmän laitteita samalla tavalla. Joustavuutta saadaan lisättyä, kun otetaan huomioon vielä tyyppikohtaiset erot joko valmistajan suositusten tai omien havaintojen perusteella. Kantaverkon laitteiden kunnossapito määräytyy nykyisin pääsääntöisesti laiteryhmän, alalaiteryhmän sekä tyyppin mukaan.

Mikäli laitteella oletetaan olevan riippuvuus iän ja vikataajuuden välillä, voidaan kunnossapito määrittää laitteen iän perusteella esimerkiksi supistamalla huoltoväliä tai tehostamalla vanhojen laitteiden kunnonvalvontaa. Katkaisijoilla käytetään myös toimintakertoja määrittämään huoltoväliä. Käyttömäärät ovat tosin sen verran pieniä, että huoltoaika ehtii tulla täyteen ennemmin. Joidenkin kaasukatkaisijoiden mittaushuoltoja tihennetään 24 vuoden iässä. Samalla toimintakertaperustainen huoltoraja putoaa 2500:sta 2000:een.

Kunnossapitoa voidaan ohjata myös suoraan vikataajuuden avulla niin, että huoltoväli määritetään laskennallisesti. Tällöin on kuitenkin tiedettävä, että kunnossapidolla voidaan ylipäätään vaikuttaa ennaltaehkäisevästi vikaantumiseen. Pelkkiä numeroita tuijottamalla voidaan helposti mennä viikaan.

Tärkeydellä tarkoitetaan lähinnä laitteen kriittisyyttä sähkönsiirron kannalta. Tällöin esimerkiksi siirtoverkon kannalta tärkeillä kytkinkentillä sijaitseviin laitteisiin voidaan soveltaa tehostettua kunnossapitoa. Tärkeysluokituksia voidaan antaa esimerkiksi sähköaseman sijainnin, laitteen roolin tai kentän tärkeyden mukaan. Tärkeysluokitukset ovat työläitä ja vaikeita määrittää, eikä niitä sen vuoksi ole vielä sovellettu kantaverkossa. Erytisen hankalaksi tärkeysluokitusten soveltamisen tekee se, että

- "Tärkeimmille" laitteille on vaikea saada keskeytyksiä ja
- 400 kV silmukoidussa verkossa käyttötilanne muuttuu jatkuvasti

Tärkeysluokituksien käyttöönottamista on harkittu Fingridissä jo vuodesta 1999 [Rin99], mutta käytännön toteutus vaatii lisää selvitystyötä. Tärkeysluokitusten on selvästi perustuttava käytön tarpeisiin. Kunnossapidon tehtävänä on puolestaan miettiä, mitä "tehostettu" tai "alennettu" kunnossapito pitää sisällään.

Kunnossapitoa voidaan toteuttaa myös tilaisuusperustaisesti esimerkiksi voimalaitosrevisioiden aikana. Tällöin laitteelle mennään aina, kun on mahdollisuus. [Rin99, Yli02]

4 Kvantitatiivinen luotettavuusanalyysi

4.1 Vikataajuuden mallinnus

Stokastisen prosessin $\{N(t), t \geq 0\}$ sanotaan olevan laskuriprosessi, jos se täyttää seuraavat vaatimukset [H&R04, Berg98]

1. $N(t) \geq 0$
2. $N(t)$ on kokonaisluku
3. Jos $t_1 < t_2$, niin $N(t_1) \leq N(t_2)$
4. Jos $t_1 < t_2$, niin $[N(t_2) - N(t_1)]$ edustaa välillä (t_1, t_2) tapahtuneita vikaantumisia

$N(t)$ on siis vikojen kumulatiivinen summa.

Prosessin nopeudeksi määritellään

$$v(t) = V'(t) = \frac{d}{dt} E(N(t)) \quad (4.1)$$

jossa $V(t) = E(N(t))$ on tapahtumien (vikojen) lukumäärän keskiarvo välillä $]0, t]$. Tätä nopeutta kutsutaan luotettavuustekniikassa absoluuttiseksi vikataajuudeksi. Usein absoluuttiseen vikataajuuteen viitataan lyhenteellä ROCOF, joka tulee englannin kielen sanoista Rate of Occurrence Of Failures. Myöhemmin tässä tekstissä absoluuttiseen vikataajuuteen viitataan yksinkertaisesti vikataajuutena.

Derivaatan määritelmästä saadaan

$$v(t) = V'(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{E(N(t + \Delta t) - N(t))}{\Delta t}. \quad (4.2)$$

Erotusosamäärää voidaan approksimoida riittävän pienillä Δt :n arvoilla seuraavasti

$$v(t) \approx \frac{E(N(t + \Delta t) - N(t))}{\Delta t}. \quad (4.3)$$

Siten luonnollinen estimaattori absoluuttiseksi vikataajuudeksi on

$$\hat{v}(t) = \frac{N(t_2) - N(t_1)}{\Delta t}, \quad (4.4)$$

jossa erotus $(N(t_2) - N(t_1))$ on siis vikojen lukumäärä aikavälillä $]t_1, t_2]$. Tätä kutsutaan myös vikataajuuden klassiseksi estimaattoriksi.

Korjattava järjestelmä laitetaan toimintaan ajanhetkellä $t = 0$. Kun järjestelmä vikaantuu, se korjataan. Korjausaika voidaan jättää huomiotta, eli kyseessä on pisteprosessikuvaus.

Yleisimmin käytetty laskuriprosessi on homogeeninen Poisson-prosessi (HPP). Tässä riittää todeta, että HPP:n väliajat ovat riippumattomia ja eksponentiaalisesti jakautuneita, josta seuraa vakiovika-taajuus

$$v(t) = \lambda \text{ kaikille } t \geq 0.$$

Tällöin välillä $]t, t + \Delta t]$ esiintyvien vikojen määrän odotusarvo on

$$E(N(t + \Delta t) - N(t)) = \lambda \cdot \Delta t. \quad (4.5)$$

Vikataajuutta ei pidä olettaa automaattisesti vakioksi. Jos näin tehdään, saatetaan menettää tietoa mahdollisista trendeistä, jotka liittyvät esimerkiksi ikääntymiseen tai sisäänajokauden vikoihin. Tässä tutkimuksessa vikaantumiskäyrien laatimisessa noudatetaan seuraavanlaista lähestymistapaa:

1. Oletetaan, että laitteilla on vakiovikataajuus kalenterivuoden mittaisissa jaksoissa ja merkittävää ikääntymistä ei siis ehdi tapahtua vuoden sisällä.
2. Oletetaan, että tarkasteltavien ryhmien laitteet ovat riittävällä tarkkuudella identtisiä.
3. Oletetaan, että korjausajat ovat merkityksettömiä, eli kyseessä on pisteprosessikuvaus.
4. Selvitetään laitekannan lisäysten ja romutusten määrät eri vuosina.
5. Lajitellaan laitteiden viat vikaantumisiän ja valmistusvuoden mukaan ja siirretään alkavaksi ajanhetkestä $t = 0$. Vikaantumisikä lasketaan valmistusvuodesta vian havaintovuoteen. (tyypin IV sensuuri)
6. Lasketaan vikataajuuden estimaattorit eri-ikäisille laitteille suhteuttamalla ne siihen populaatioon, joka todella voi olla sen ikäinen.
7. Tehdään trendianalyysi näin saatuun vikataajuusestimaatioiden diskreettiaikaiseen pistejoukkoon.

Kyseinen menetelmä ei välttämättä ole matemaattisessa mielessä kaunein mahdollinen, mutta tämän tarkastelun puitteissa ainoa käytännöllinen menetelmä. Menetelmä on sovellettu lähteestä [Bert02].

4.2 Vikojen välinen aika

Luotettavuuslaskennassa vikataajuutta havainnollisempia tunnuslukuja ovat keskimääräinen aika vikojen välinällä MTBF (Mean Time Between Failures) ja hetkellinen keskimääräinen vikojen väli-

nen aika *IMTBF* (Immediate Mean Time Between Failures). Aritmeettisella keskiarvolla laskettu *MTBF* eli keskimääräinen aika vikaantumisten välillä määritellään [Jon95, N/S07]

$$MTBF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i = \frac{1}{\lambda}, \quad (4.6)$$

missä n = vikojen määrä,

t_i = aika vikojen välillä ja

λ = vakiovikataajuus

MTBF ei ole järkevä suure, jos absoluuttinen vikataajuus on ajan mukaan muuttuva. *MTBF*:n sijaan käytetään hetkellistä keskimääräistä aikaa vikaantumisten välillä, jossa vikataajuuden sallitaan muuttua ajan funktiona (Immediate Mean Time Between Failures). Tämä sisältää täsmälleen saman informaation kuin vikataajuuskäyrä mutta käänteisenä. [Jon95, N/S07].

$$IMTBF = \frac{1}{v(t)}. \quad (4.7)$$

4.3 Käytettävyys ja epäkäytettävyys

Korjattaville järjestelmille keskimääräinen käytettävyys (availability) määritellään [Jon95]

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}, \quad (4.8)$$

missä *MTTR* = keskimääräinen korjausaika.

Epäkäytettävyys (unavailability) on silloin luonnollisesti

$$U = 1 - A. \quad (4.9)$$

Käytettävyys kertoo yksinkertaisesti, kuinka suuren osan ajasta järjestelmä tai laite on keskimäärin käytettävissä.

4.4 Vian etsintäväli

Aikaperustaista vian etsintää tehdään usein suojaavien laitteiden piilevien vikojen löytämiseksi. Suojaava laite on sellainen, joka ei ole aktiivinen laitteen toimiessa oikein, mutta jolta edellytetään toimintaa päälaitteen suojaamiseksi vian sattuessa. Koska kytkinlaitteita käytetään kohtuullisen tai erittäin harvoin, suuri osa vioista saattaa olla piileviä, vaikka kyseessä ei varsinaisesti ole suojaavan toiminnon vika. Lineaarinen yhteys [Mou97]

$$FFI = 2U_D \cdot MTBF = \frac{2U_D}{\lambda}, \quad (4.10)$$

missä U_D = sallittu epäkäytettävyys,

on olemassa sallitun epäkäytettävyuden ja keskimääräisen vikaantumisaian välillä, mikäli U_D on pienempi kuin 5 % ja vikaantuminen on satunnaista (vakiovikataajuus). Kaavaa voidaan käyttää yhtä hyvin myös joidenkin kunnonvalvontatoimenpiteiden toistovälien arvioimisessa.

4.5 Riski

Riski $R(t)$ on pääsääntöisesti ajan funktio ja se voidaan määrittellä todennäköisyyden $P(t)$ ja seurauksen $C(t)$ tulona [Jon95]:

$$R(t) = P(t) \cdot C(t). \quad (4.11)$$

Riskiin voidaan vaikuttaa määrittelyn seurauksena kolmella tavalla:

- Muuttamalla todennäköisyyttä
- Muuttamalla seurausta
- Muuttamalla sekä todennäköisyyttä että seurausta

Riskin modifikaatio määrittellään riskin ajallisenä nettomuutoksena, jolloin tulon derivointisääntöjen mukaan saadaan [Jon95]:

$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{dP(t)}{dt} \cdot C(t) + P(t) \cdot \frac{dC(t)}{dt}. \quad (4.12)$$

Riskin modifikaation määrittely kertoo sen yksinkertaisen tosiasian, että tehokkain tapa vähentää erittäin suurien seurausten riskiä, on pyrkiä pienentämään sen todennäköisyyttä. Vastaavasti suurten todennäköisyyksien tapahtumien kohdalla on tehokkainta pyrkiä vaikuttamaan seurauksiin.

Sähkönsiirrossa yleinen seurauksen mitta on toimittamatta jäänyt sähköenergia (TJSE) tai sen arvo (TJSA). Vuosittainen esiintymistaajuus voidaan tulkita suoraan todennäköisyydeksi.

4.6 Sensurointi

Sensurointi tarkoittaa tilastotieteessä sitä, että tarkasteluvälin ulkopuolelle jätetään aina informaatiota käytännön syistä. Tätä tietoista rajausta kutsutaan sensuuriksi, jota on neljää eri päätyyppiä. Tyypin I sensuurissa tarkastelu-aika on kiinteä ja vikatapahtumien määrä satunnainen.

Tyypin II sensuurin koejärjestelyissä puolestaan odotetaan kunnes on todettu n -vikaantumista, jolloin siis aika on satunnainen ja vikatapahtumien määrä kiinteä.

Tyypin III sensuuri on yhdistelmä kahdesta ensimmäisestä, jolloin odotetaan, että joko määritelty aika kuluu umpeen tai että kaikki koeyksiköt vikaantuvat.

Tyypin IV sensuurissa kokeeseen osallistuvat yksiköt aktivoidaan satunnaisina ajanhetkinä ja siirretään myöhemmin origoon. Tämän työn tarkasteluissa käytetään pääsääntöisesti tyypin IV sensuuria, koska laitekantaa on lisätty verkkoon eri vuosina näennäisen satunnaisesti. [H&R04, Berg98].

5 Erottimet

5.1 Yleistä

Erottimien tehtävänä on erottaa verkon jännitteiset osat jännitteettömistä kunnossapito- tai rakennustöitä varten. Työturvallisuussyistä erottimien on muodostettava näkyvä tai muuten luotettavasti todennettava avausväli jännitteettömän ja käytössä olevan virtapiirin välille. Erottimia voidaan käyttää myös ohituskytkentöihin, joilla mahdollistetaan jatkuva sähkön syöttö jonkin laitteen keskeytyksen aikana. Usein erottimen yhteyteen on asennettu maadoituskytkin, jolla voidaan maadoittaa työn kohteena oleva jännitteetön verkon osa ja näin estää mahdollisten virhekytkentöjen aiheuttamat vaarajännitteet. Erottimilta ei tavallisesti vaadita virran katkaisu- eikä sulkemiskykyä, mutta niillä voidaan erottaa pieniä kuormia kuten lyhyitä tyhjäkäyviä johtoja tai muuntajia.

Lukumäärällisesti suurin osa erottimista sijaitsee sähköasemilla, mutta niitä tarvitaan myös voimajohtojen varsilla ja haaroituskohdissa. Näillä ns. korpierottimilla voimajohdot voidaan jakaa jännitteettömiin osuuksiin johtojen kunnossapitotöitä varten. Korpierottimia käytetään myös vikojen eristämiseen muusta verkosta [FG02, Yli02, Yli07].

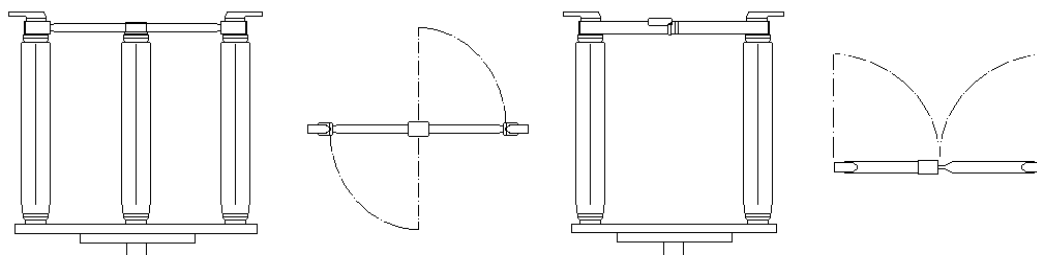
5.2 Erottimien alalaiteryhmät

Kantaverkon ilmaeristeiset erottimet voidaan karkeasti jakaa kolmeen eri alalaiteryhmään:

- Kiertoerottimet
- Tartuntaerottimet
- Veitsierottimet

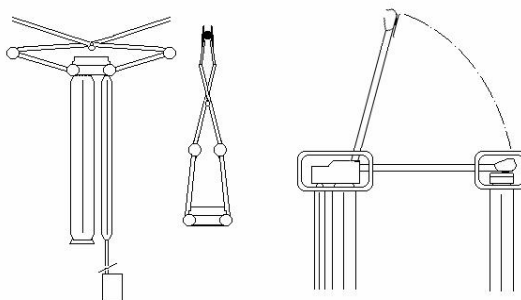
Yleisin ryhmä ovat kiertoerottimet, joiden kosketinvarsien liike tapahtuu horisontaalisesti kiertoeristimien välityksellä kuvan 5-1 mukaisesti. Valtaosa kiertoerottimista on kaksipilarisia. Kolmipilarisia kiertoerottimia käytetään lähinnä tähtipiste-erottimina niiden vähäisen asennustilan tarpeen takia. Niille sallitaan myös jonkin verran suuremmat köysivoimat liittimissä, mikä on saattanut olla valintakriteerinä erotinta valittaessa.

Kolmipilarisia kiertoerottimia ei kuitenkaan periaatepäätöksen mukaan enää hankita kantaverkoon. Kiertoerottimet ovat yleisimpiä kytkinlaitoksilla, joissa tarvitaan rinnanasetusta, mutta ne voidaan asentaa myös jonoon.



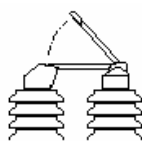
Kuva 5-1. 3- (vas.) ja 2-pilaristen (oik.) kiertoerottimien toimintaperiaate

Tartuntaerottimet voidaan edelleen jakaa suoravartisiin, polvi- ja saksi- eli pantografierottimiin. Suoravartisten tartuntaerottimien kosketinvarret liikkuvat saranamaisesti pystysuunnassa yhden nivelen varassa. Pantografierottimien kosketinvarret liikkuvat kuten teleskooppipihdit pystysuorassa linjassa. Polvierottimia puolestaan on sekä vertikaalisia että horisontaalisia ja ne liikkuvat kahden nivelen varassa suorassa linjassa taipuen keskeltä. Koska vertikaalisesti operoivat tartuntaerottimet tarvitsevat stationaarisen vastakoskettimen, niitä voidaan käyttää vain asemilla, joilla on kiinteät putkikiskot. Horisontaalista polvierotinta sen sijaan voidaan käyttää myös köysikiskostoissa. Tartuntaerottimien suurin etu kiertoerottimiin nähden on pieni asennuspinta-alan tarve ja heikkoutena hieman monimutkaisempi rakenne ja korkeampi hinta. Tartuntaerottimet tarvitsevat voimansiirtoa varten erillisen kiertoeristimen tukieristimen rinnalle. Pantografin ja suoravartisen tartuntaerottimen toimintaperiaatetta on havainnollistettu kuvassa 5-2.



Kuva 5-2. Pantografi-tyyppisen (vas.) ja suoravartisen tartuntaerottimen (oik.) toimintaperiaatteet.

Veitsierottimia käytetään lähinnä 10 ja 20 kV verkoissa eli niiden käyttö kantaverkossa rajoittuu lähinnä omakäyttöjärjestelmään. Veitsierottimien kosketinvarret liikkuvat pystysuunnassa yhden vipuvarren varassa kuvan 5-3 mukaisesti [FG02, Yli02, Lai07].



Kuva 5-3. Veitsierottimen toimintaperiaate.

5.3 Erottimien osat

Erottimen pääosat ovat virtatiet, ohjain, eristimet ja voimansiirto. Virtateiksi voidaan käytännössä katsoa kaikki tukieristimen yläpuoliset jännitteelliset rakenteet. Päävirtatiet ovat puolestaan ne osat, jotka on varsinaisesti mitoitettu kuljettamaan suurin osa kuormavirrasta. Ajan myötä päävirtateiden ylimenoresistanssi voi kasvaa, jolloin virta voi alkaa kiertämään vaihtoehtoisia reittejä pitkin, mikä aiheuttaa ei-toivottuja lämpenemiä. Tärkeimpiä virtateiden osia ovat:

- Pääkoskettimet
- Primääriiliittimet
- Kosketinvarret
- Liukukoskettimet, joita on vain nivelletyissä erottimissa

Vertikaalisten tartuntaerottimien kiinteää vastakosketinta kutsutaan trapetsikoskettimeksi. Kyseessä on putkikiskoon asennettu eräänlainen "kahva", johon varsinaisen erottimen pääkoskettimet tarttuvat.

Eristimen tehtävänä on eristää erottimien jännitteiset osat maasta, tukea erotinta mekaanisesti (tukieristin) sekä toimia osana voimansiirtoa (kiertoeristin). Kiertoerottimissa sama eristin toimii molemmissa rooleissa. Eristimissä voidaan käyttää useita eri eristysmateriaaleja, mutta yleisimpiä ovat posliini ja synteettiset polymeerit, joita ei tosin Fingridin erottimissa ole käytetty. Tukieristinmateriaalien tärkeimpiä valintakriteerejä ovat jännitelujuus sekä erityisesti mekaaninen lujuus.

Erottimen ohjaimen tehtävä on tuottaa liike-energia voimansiirrolle ja sitä kautta kosketinvarsille. Suurin osa kantaverkon erottimista on varustettu moottoriohjaimella. Voimajohtojen syrjäisillä erotinasemilla ei välttämättä ole mahdollisuutta moottoriohjaimen tarvitsemaan apusähköön, joten korpierottimet ovat usein käsiohjattuja. Myös moottoriohjattuja erottimia voidaan tarvittaessa ohjata kammella. Moottoriohjaimet on normaalisti kytketty 110 tai 220 V tasasähköjärjestelmään.

Ohjainkotelon sisältämiä osia ovat itse sähkömoottori, pyörästö, riviliittimet, apukoskettimet, kuivausvastus sekä lukitusmekanismi. Riviliittimiin tuodaan varsinaiset ohjauskäskyt asemarakennuksen ala-asemalta (kaukokäyttö) tai paikallisesti painonapilta. Apukoskettimet puolestaan välittävät erottimen tilatiedot paikallisvalvomoon ja ala-asemalle.

Kuivausvastuksen tehtävä on estää kosteuden kerääntyminen ohjaimen ja sitä kautta ennaltaehkäistä korroosiota. Kuivausvastukset, kuten aseman muukin lämmitys, kytketään vaihtovirtaomakäytön perään, jottei akustoja turhaan rasitettaisi toissijaisilla tehtävillä hätätilanteissa.

Lukitusmekanismin tehtävänä on estää mahdolliset virhekytkennät asemalle ohjelmoitujen lukitusehtojen mukaan. Lukitusmekanismin tärkein osa on lukituskela, joka toimii sähkömagneettina ja

ohjaa lukituksen liikkuvia osia. Lukitus voidaan tarvittaessa vapauttaa myös käsin ilman lukitus-sähköjä.

Kaikista erottimen funktionaalisista osista voimansiirto on vaikein rajata. Periaatteessa se käsittää ohjaimen vaihteiston, tangon, vivuston, laakerit, nivelet sekä kiertoeristimet, joilla liike saadaan välitettyä kosketinvarsille. Tässä työssä voimansiirto ja ohjaimen mekaaniset osat niputetaan yhteen. Myös jännitteelliset mekanismilaatikat lasketaan voimansiirron osiksi. Eristimiä ei huomioida osana voimansiirtoa.

5.4 Erottimen toiminnot ja niiden vikaantumiset

Fingridissä vuonna 2002 tehdyissä RCM-analyyseissä [RCM02] erottimille määriteltiin yksitoista toimintoa, joista niiden on suoriuduttava. Yhdestoista toiminto eli piirin maadoittaminen, on kuitenkin selvästi maadoituskytkimen eikä varsinaisen erottimen tehtävä, joten sitä ei sisällytetä listaan. Toimintojen alle on merkitty niiden yleisimmät toimintojen vikaantumiset. Vikamuotoja ei ole listattu erikseen, jottei listasta tulisi kohtuuttoman pitkä.

Erottimen primääritoiminnot ja niiden yleisimmät vikaantumiset ovat:

- 1) Katkaista virraton tai tyhjäkäyvä virtapiiri
 - a) Erotin ei aukea
 - b) Erotin aukeaa osittain
- 2) Sulkea virraton tai tyhjäkäyvä virtapiiri
 - a) Erotin ei sulkeudu
 - b) Erotin sulkeutuu osittain
- 3) Pysyä auki
 - a) Erotin sulkeutuu itsestään
- 4) Pysyä kiinni
 - a) Erotin avautuu itsestään
- 5) Erottaa virtapiirit näkyvästi toisistaan

Toiminto numero viisi on luonteeltaan sellainen, että sen onnistuminen on sidoksissa toimintoihin yksi ja kolme, joten sille ei ole mielekästä määrittää erillistä vikaantumista.

Sekundääritoiminnot ja niiden yleisimmät vikaantumiset ovat:

- 1) Johtaa virtaa riittävän pienellä resistanssilla
 - a) Ylimenoresistanssi liian suuri
- 2) Eristää vaiheet toisistaan ja maasta
 - a) Maasulku
 - b) Oikosulku

- 3) Lukita erotin sähköisesti ja mekaanisesti
 - a) Erotin ei lukitu auki/kiinni
 - b) Erotin ei pysy lukittuna
- 4) Antaa tilatieto
 - a) Ei anna tilatietoa
 - b) Antaa väärän tilatiedon
- 5) Antaa hälytys virheellisestä toiminnasta
 - a) Ei anna hälytystä
 - b) Antaa väärän hälytyksen

5.5 Tarkasteltava erotinpopulaatio

Suomen kantaverkon erotinpopulaatio on ollut ja edelleen on hyvin kirjava; erottimia on yli 70:ntä eri tyyppiä. Samalla tyyppimerkinnällä olevaa erotinta voi myös olla useassa eri jännitetasossa ja ne saattavat poiketa mitoitukseltaan jonkin verran toisistaan. Tässä tarkastelussa kuitenkin oletetaan, ettei jännitetasolla ole oleellista merkitystä erottimien vikaantumiseen. Taulukossa 5-1 on esitetty kantaverkon yleisimmät erotintyypit.

Taulukko 5-1. Kantaverkon yleisimmät erottimet tammikuussa 2007.

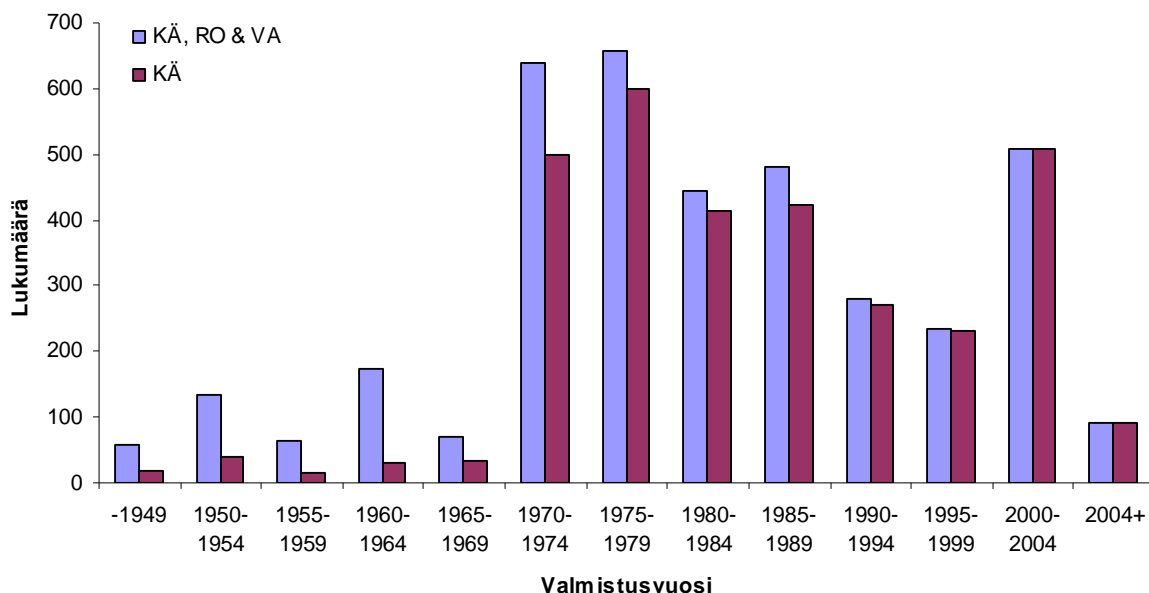
Tyyppi	Alalaiteryhmä	Lukumäärä	Jännitetasot
OJYD	Kiertoerotin, 2 pilaria	735	110, 220
SSB	Kiertoerotin, 2 ja 3 pilaria	598	110, 220, 400
OJYW	Polvierotin vertikaali	274	110, 400
UEV	Kiertoerotin, 2 pilaria	209	110, 220
OJYC	Kiertoerotin, 3 pilaria	199	110, 400
GSSB	Saksierotin	162	110, 220, 400
TPF	Saksierotin	162	220, 400
D300	Kiertoerotin, 2 pilaria	94	20, 110, 220, 400
OJON	Veitsierotin	90	10, 20
FV	Tartuntaerotin, suoravartinen	89	110
SGF	Kiertoerotin, 2 pilaria	73	20, 110, 220, 400
VSSB	Tartuntaerotin, suoravartinen	53	400
UEA	Kiertoerotin, 2 pilaria	41	110, 220
NPP	Kiertoerotin, 3 pilaria	40	110
TSF	Kiertoerotin, 2 pilaria	36	220, 400
TVF	Tartuntaerotin, suoravartinen	32	110

Taulukossa 5-2 erottimien määrä on esitetty alalaiteryhmän mukaan. Suurin osa kantaverkon erottimista eli noin 67 % on kiertoerottimia. Tartuntaerottimia on noin 29 % ja veitsierottimia 4 %.

Taulukko 5-2. Erottimien lukumäärä alalaiteryhmän mukaan.

Alaiteryhmä	Lukumäärä	Osuus
Kiertoerotin, 2 pilaria	1884	58 %
Kiertoerotin, 3 pilaria	299	9 %
Polvierotin horisontaali	46	1 %
Polvierotin vertikaali	285	9 %
Saksierotin (pantografi)	334	10 %
Tartuntaerotin, suoravartinen	210	6 %
Veitsierotin	140	4 %
Ei merkintää laiterekisterissä	36	1 %
Yhteensä	3234	100 %

Kuvassa 5-4 on kuvattu kantaverkon erottimien valmistusvuoden jakauma. Siniset pilarit sisältävät kaikki erottimet eli käytössä olevat, varastoidut ja romutetut. Punaiset pilarit puolestaan kuvaavat vain nykyään käytössä olevia laitteita. Pilarien välisestä korkeuserosta voi nähdä likimäärin romutettujen laitteiden osuuden. Histogrammista on helppo havaita 70-luvun rakennusbuumi ja se, että suurin osa näistä laitteista on edelleen käytössä. Ennen 1970-lukua valmistetuista erottimista valtaosa on romutettu. Romutettuja erottimia on koko kirjatun historian ajalta hieman alle 600 kpl. Jos erottimista, joissa on tiedot valmistusvuodesta ja romutusajankohdasta (292 kpl), lasketaan keski-ikä, saadaan tulokseksi noin 31 vuotta. Nykyisen käytössä olevan erotinkannan keski-ikä on noin 21 vuotta.



Kuva 5-4. Nykyään käytössä olevien sekä romutettujen ja varastoitujen erottimien jakauma valmistusvuoden mukaan.

6 Katkaisijat

6.1 Yleistä

Katkaisija on kytkinlaite, jonka tehtävänä on kyetä erottamaan ja yhdistämään verkon osia sekä normaalikuormituksilla että vikatilanteissa, joissa virrat saattavat olla moninkertaisia nimelliseen nähden. Oiko- ja maasulkutilanteissa katkaisija toimii suojarleiden antamien laukaisukäskeyjen ohjauksesta. Useimmiten ohimenevät viat, kuten salamaniskujen aiheuttamat maasulut, saadaan poistettua, kun vika ensin erotetaan verkosta ja sitten tehdään automaattinen pika- ja aikajälleenkytkentä. Normaaleissa kytkennöissä katkaisijaa voidaan ohjata sekä kaukokäytöllä että paikallisesti.

Erityyppisten katkaisijoiden rakenteet poikkeavat huomattavasti toisistaan. Yleisimmin käytettyjä katkaisijatyyppejä ovat vähäöljy-, tyhjö-, paineilma- ja SF₆-kaasukatkaisijat. Tyhjökatkaisijoita ei kuitenkaan kantaverkossa käytetä.

Katkaisijan tärkeimpiä mitoitusarvoja ovat nimellisvirta, nimellistaajuus, eristystaso ja katkaisukyky. Katkaisija joutuu kestäämään useanlaisia rasituksia kuten, suurten vikavirtojen aiheuttamia mekaanisia (dynaaminen oikosulkukestoisuus) voimia, reaktiivisia virtoja ja epätahtitilanteita. Katkaisijan mitoitusarvojen valinta riippuu siis pitkälti roolista, jossa laitetta aiotaan käyttää. Tyypillisiä rooleja katkaisijoille ovat:

- Johtokatkaisija
- Kiskokatkaisija
- Muuntajakatkaisija
- Generaattorikatkaisija
- Kompensointikatkaisija

Kompensointilaitteiden katkaisijat ovat kantaverkossa erityisen vaativassa tehtävässä. Ne saattavat toimia keskimäärin jopa kerran päivässä, joten niille tulee huomattavasti enemmän toimintakertoja kuin esimerkiksi johtokatkaisijoille, jotka toimivat varsin harvoin. Lisäksi rinnakkaisreaktoreiden ja kondensaattoriparistojen reaktiivisten virtojen katkaisu rasittaa katkaisijaa merkittävästi. Kompensointilaitteita käytetään verkon jännitteen säätöön tuottamaan tai kuluttamaan loistehoa. [FG02]

6.2 Katkaisijoiden alalaiteryhmät

Vähäöljykatkaisijat edustavat paineilmakatkaisijoiden kanssa katkaisijoiden edellistä sukupolvea. Vähäöljykatkaisijoita ei enää valmisteta, mutta niitä on edelleen runsaasti käytössä. Vähäöljykatkaisijan valokaarensammutus perustuu öljyn höyrystymisestä syntyvään paineeseen ja siitä aiheutuvaan virtaukseen. Virtaus voi olla valokaareen nähden joko pitkittäistä tai poikittaista. Vähäöljykatkaisijat tarvitsevat verrattain pienen ohjausenergian.

Paineilmakatkaisijat sopivat erittäin vaativiin olosuhteisiin suuren katkaisukykyensä takia. Valokaaren sammutus ja mekaniikan ohjaaminen perustuu paineilmaan, jonka käyttöpaine on noin 30 baria. Paineilmakatkaisijat ovat kuitenkin rakenteensa puolesta monimutkaisia ja ne vaativat erillisen paineilmaakeskuksen. Monimutkaisuutensa vuoksi ne eivät voi kilpailla hinnalla ja ne ovat selvästi alttiimpia vioille kuin muut katkaisijat.

SF₆-katkaisijat edustavat katkaisijoiden nykyistä sukupolvea. Niissä käytetään katkaisuväliaineena rikkiheksafluoridia, jolla on erinomaiset eristys- ja jäähdytysominaisuudet. SF₆-katkaisijoiden etuina ovat lisäksi sammutuskammion yksinkertainen rakenne, pieni fyysinen koko, luotettavuus ja pitkä sähköinen elinikä.

Ensimmäiset kaasukatkaisijat toteutettiin kaksipaineisina siten, että korkeapaineosasta johdettiin kaasua matalapaineosassa sijaitsevaan katkaisukohtaan. Ratkaisun ongelmana oli erityisesti apulaitteiden tarve. SF₆-katkaisijat yleistyivät vasta sen jälkeen, kun yksipaine- eli bufferijärjestelmä kehitettiin. Siinä kaasun paine-ero saadaan aikaan liikkuvaan koskettimeen kytketyllä mäntärakenteella. Haittapuolena on kuitenkin selvästi suurempi ohjausenergian tarve esimerkiksi samankokoiseen vähäöljykatkaisijaan nähden, mikä rasittaa ohjainta.

Kehittynein versio kaasukatkaisijasta on niin sanottu self-blast -periaatteella toimiva ratkaisu, jossa käytetään hyväksi valokaaren aikaansaamaa paineennousua kaasussa. Paine synnyttää tarvittavan virtauksen sekä auttaa aukiohjauksessa. Etuina ovat kevytrakenteisuus, kosketinpuikon lyhyt toimintaetäisyys ja nopeus. Myös ohjausenergian tarve on huomattavasti pienempi kuin bufferimallissa. [FG02]

6.3 Katkaisijan osat

Katkaisijan pääosat ovat napa, voimansiirto, tukieristin ja ohjain. Napa käsittää katkaisijan tukieristimen yläpuolisen jännitteellisen osan, jossa sijaitsevat katkaisupäät ja liittimet. Katkaisupäiden sisällä katkaisukammioissa sijaitsevat koskettimet, joiden avulla varsinainen avausväli muodostetaan. Toinen kosketinparista on yleensä kiinteä ja toinen liikkuva. Vanhemmissa 400 kV vähäöljykatkaisijoissa saattaa olla kahdeksankin katkaisupäätä sarjassa niin, että palaava jännite saadaan

jaettua useampaan osaan. Nykyisin yhdessä 400 kV SF₆-katkaisijan navassa on tyypillisesti vain kaksi katkaisupäätä sarjassa. Jännitteen tasaisesta jakautumisesta huolehditaan katkaisupäiden rinnalle kytkettävillä jännitteenjakokondensaattoreilla.

Ohjaimen tehtävä on tuottaa katkaisupäälle sen tarvitsema liike-energia, joka välitetään yleensä onton tukieristimen sisällä sijaitsevalla kytkentätangolla liikkuville koskettimille. Voimansiirtoon voidaan käyttää myös erillistä kiertoeristintä. Liike voi siis olla nykäisevä tai kiertävä. Kaikissa ohjaimissa liike-energia tuotetaan sähkömoottorilla, mutta varastointitapa vaihtelee. Yleisin ohjaintyyppi on moottorijousohjain, jossa energia varastoidaan jousiin. Vajaa viidesosa katkaisijoista on varustettu hydrauliohjaimilla, joiden ohjausenergia varastoidaan painevaraajaan ja vapautetaan aukaisemalla ja sulkemalla venttiileitä. Käyttöpaine luodaan hydraulipumpulla. Paineilmaohjaus toimii samalla periaatteella, mutta katkaisijaryhmällä on yhteinen kompressorilaitos.

Kun katkaisija on vireessä eli ohjattavissa, se kykenee suorittamaan AUKI-KIINNI-AUKI ohjausjakson, jota tarvitaan esimerkiksi tilanteessa, jossa pikajälleenkytkentä tehdään pysyvässä viassa, ja katkaisija avautuu uudelleen. Aukiohjaukseen kuluva aika on tyypillisesti alle 40 ms ja kiinniohjaus 100 ms luokkaa vaihdellen katkaisijasta riippuen. 400 kV katkaisijoilla on kullekin vaiheelle omat ohjaimensa, mutta suurimmassa osassa 220 kV ja kaikissa 110 kV katkaisijoissa on yksi yhteinen ohjain. [FG02, Lai07, Sie01, Yli02]

6.4 Katkaisijan toiminnot ja niiden vikaantumiset

Alla on listattu erottimia vastaavalla tavalla katkaisijan primääri- ja sekundääritoiminnot ja näiden yleisimmät vikaantumiset. Katkaisijalla primäärisiä toimintoja on kuusi ja sekundäärisiä viisi. Toiminnon vikaantumisia voidaan tunnistaa selvästi enemmän kuin erottimilla. Listaus perustuu vuonna 2002 tehtyyn RCM-työryhmän analyysiin [RCM02], joka toteutettiin ensisijaisesti HGF-tyyppisille katkaisijoille.

Katkaisijoiden primääritoiminnot ja niiden vikaantumiset ovat:

- 1) Katkaista virtapiiri kolmivaiheisesti
 - a) Mikään vaihe ei aukea
 - b) Epäsymmetrinen eli vajaanapainen katkaaisu
 - c) Virta ei katkea
 - d) Aukeaa liian hitaasti
 - e) Aukeaa liian suurella eriaikaisuudella
- 2) Sulkea virtapiiri kolmivaiheisesti
 - a) Mikään vaihe ei sulkeudu
 - b) Epäsymmetrinen sulkeutuminen
 - c) Sulkeutuu epätäydellisesti (valokaari)

- d) Sulkeutuu liian hitaasti
- e) Sulkeutuu epäsymmetrisesti
- 3) Suorittaa jälleenkytkennät (johtokatkaisijat)
 - a) Katkaisija ei sulkeudu avauksen jälkeen
- 4) Johtaa virtaa riittävän pienellä resistanssilla kiinni ollessaan
 - a) Liian suuri resistanssi
- 5) Pysyä auki
 - a) Läpilyönti koskettimien välillä
- 6) Pysyä kiinni
 - a) Kaasun paine liian alhainen
 - b) Aukeaa välittömästi sulkemisen jälkeen

Sekundääritoiminnot ja niiden vikaantumiset ovat:

- 7) Eristää maa ja vaiheet toisistaan
 - a) Maa- tai oikosulku
- 8) Antaa sähköinen ja mekaaninen tilatieto katkaisijan auki- tai kiinnioloista
 - a) Ei anna tilatietoa
 - b) Tilatieto virheellinen
- 9) Antaa hälytys virheellisestä toiminnasta
 - a) Ei anna hälytystä
 - b) Väärä hälytys
- 10) Säilyttää katkaisuväliaine katkaisupäässä vaadittavassa kunnossa
 - a) Vuotaa väliainetta
 - b) Päästää kosteutta katkaisupäähän
- 11) Näyttää toimintokerrat
 - a) Ei näytä toimintokertoja oikein

6.5 Tarkasteltava katkaisijapopulaatio

Tässä työssä tarkastellaan vain kaasu- ja vähäöljykatkaisijoita. Paineilmakatkaisijoita on vielä käytössä muutamalla asemalla yhteensä 34 kolmivaiheyksikköä, mutta niiden elinkaari alkaa olla jo loppuillaan.

Taulukossa 6-1 on esitetty Fingridin käytössä olevat SF6-kaasukatkaisijat ja taulukossa 6-2 vähäöljykatkaisijat. Vähäöljykatkaisijoiden populaatio muodostuu käytännössä enää HPF- ja HLR-tyyppisistä laitteista. Kaasukatkaisijoista tyypit 8DN8, ELK SL ja LSEP ovat GIS-katkaisijoita.

Taulukko 6-1. Kaasukatkaisijoiden lukumäärät tyypeittäin.

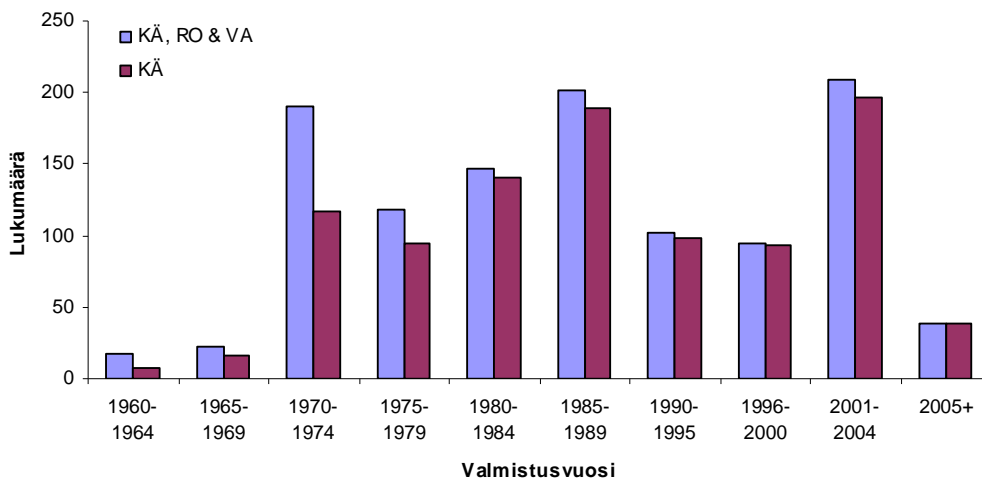
Tyyppi	Lukumäärä
HGF	198
HPL	127
LTB	84
S1-123F1	53

3AP/Q	32
GL	32
ELF SL	26
8DN8	21
FG	18
FA1	18
ELK SL	12
LSEP145	12
Muut	14
Yhteensä	647

Taulukko 6-2. Vähäöljykatkaisijoiden lukumäärät tyypeittäin.

Tyyppi	Lukumäärä
HPF	162
HLR	120
OSAR	18
Muut	48
Yhteensä	348

Kuvassa 6-1 on taulukoiden katkaisijoiden jakauma valmistusvuosien mukaan. Vanhimmat käytössä olevat katkaisijat ovat vuodelta 1960 eli ne ovat tätä kirjoitettaessa 47-vuotiaita. Vähäöljykatkaisijoiden keski-ikä vuoden 2007 alussa on noin 30 ja kaasukatkaisijoiden 13 vuotta. Koko kantaverkon katkaisijapopulaation (pl. paineilma) keski-ikä on noin 19 vuotta. Katkaisijoita on romutettu noin 220 kpl, joista lähes kaikki ovat olleet vähäöljy- tai paineilmakatkaisijoita. Romutettujen vähäöljykatkaisijoiden keski-ikä on ollut noin 33 vuotta ja paineilmakatkaisijoiden noin 39 vuotta.



Kuva 6-1. Nykyisin käytössä olevien, romutettujen ja varastoitujen kaasu- ja vähäöljykatkaisijoiden jakauma valmistusvuoden mukaan.

7 Vikatietojen analyysi

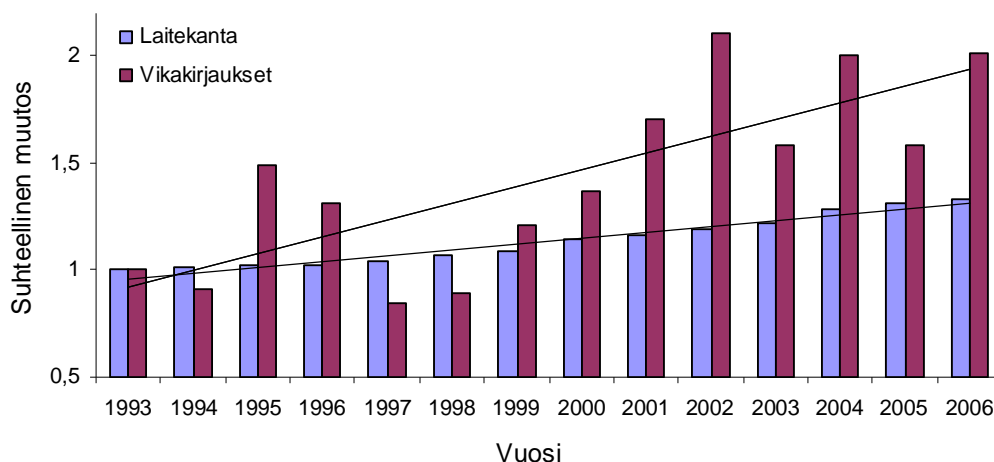
7.1 Yleistä

Vikatietojen tulkitseminen ei yleensä ole helppoa. Ne saattavat sisältää subjektiivisia tulkintoja ja suoranaisia virheitä, jotka johtuvat huolimattomuudesta tai väärinkäsityksistä. Lisäksi vikatietoja on tavallisesti liian vähän, tai niin kuin tässä tutkimuksessa, melko lyhyeltä aikaväliltä.

Vikatiedot sisältävät lisäksi epäsuoraa informaatiota kunnossapidosta. Todellisiin vikaantumiskäyriin päästäisiin käsiksi, jos tiedoista voitaisiin suodattaa pois kunnossapidon vaikutus. Tällöin saataisiin käyrä, joka kuvaisi vikataajuutta ilman kunnossapitoa. Vikatietojen erottelu kunnossapidon toteutumisiin liittyvästä oheisinformaatiosta on kuitenkin käytännössä lähes mahdotonta. Matemaattisia periaatteita on kyllä olemassa, mutta puhdistukseen vaaditaan sellaisia lähtötietoja, joita ei yleensä ole saatavilla tai joiden arvioiminen vain lisää epävarmuutta.

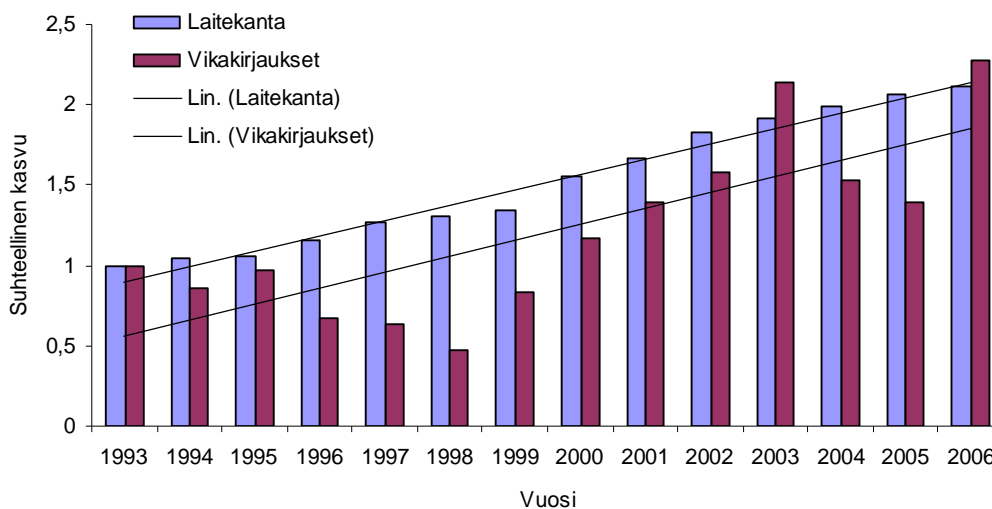
7.2 Laitemäärän ja vikakirjausten kehittyminen

Kuvassa 7-1 on esitetty erotinkannan ja vikakirjausten suhteellinen kasvu verrattuna vuoteen 1993. On aivan ilmeistä, että vikahavaintojen määrä on erottimien kohdalla noussut nopeammin kuin laitekannan lisäys. Tämä on todennäköisesti seurausta siitä, että laitevikojen kirjaukseen on kiinnitetty enemmän huomiota.

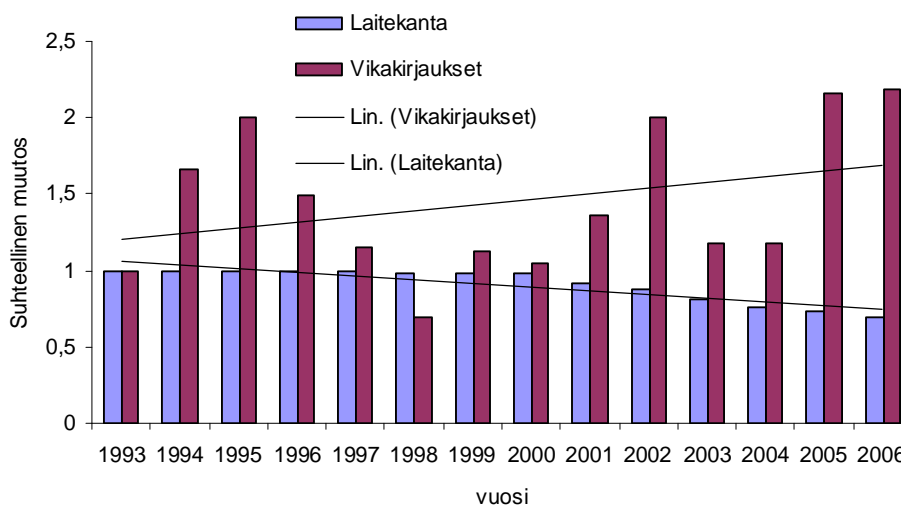


Kuva 7-1. Erottimien vikailmoitusten ja laitekannan suhteellinen kasvu verrattuna vuoteen 1993.

Kuvissa 7-2 ja 7-3 on esitetty vastaavanlaiset histogrammit katkaisijoille. Kaasukatkaisijoilla vikakirjausten ja laitekannan kasvu kulkee keskimäärin käsi kädessä. Sen sijaan vähäöljykatkaisijoilla vikojen määrä on jatkanut nousua laitekannan vähenemisestä huolimatta.



Kuva 7-2. SF6-katkaisijoiden vikailmoitusten ja laitekannan muutos verrattuna vuoteen 1993.



Kuva 7-3. Vähäöljykatkaisijoiden vikailmoitusten ja laitekannan muutos verrattuna vuoteen 1993.

7.3 Erottimien viat

7.3.1 Erottimien Major- ja minor-vikaluokitukset

Fingridin nykyisin omistamille erottimille on vuoteen 2006 mennessä kirjattu kaikkiaan 1424 erotinvikaa, joista noin 10 % on ollut vakavia Major-vikoja. Vikailmoitus on voinut saada luokituksen "havainto", mikäli se ei täytä vian määritelmää. Kyseessä on siis hyvin vähäpätöinen huomautus. Osa laitevikailmoituksista ei ole saanut lainkaan luokitusta puutteellisten selostuksien takia. Suurin osa näistä on syötetty tietokantaan jälkikäteen.

Taulukko 7-1. Erotinvikojen määrä luokituksen mukaan

Laitevian aste	lkm	osuus
Major	139	10 %
minor	1165	82 %
havainto	80	6 %
ei mainintaa	40	3 %
Kaikki yhteensä	1424	100 %

Erotinvika saa Major-luokituksen mikäli:

- Erotin on jäykkä eikä ohjaaminen enää ole mahdollista
- Tukieristin on poikki (jolloin se on vaihdettava välittömästi)
- Tukieristimessä on halkeama, UÄ-mittaus luokassa 4 (vaihdettava myös välittömästi)
- Erotin ei sulkeudu tai avaudu kokonaan

Erotinvika saa puolestaan minor-luokituksen mikäli:

- Erotin on jäykkä, mutta ohjaus mahdollista
- Erottimen ohjaus ei toimi sähköisesti, mutta toimii käsin
- Tukieristimessä on halkeama, UÄ-mittaus luokassa 2 tai 3 (vaihdettava ensitilassa)
- Koskettimissa esiintyy normaalia suuremmat ylimenovastukset (korkea lämpenemä tai ylimenoresistanssin mittaus)

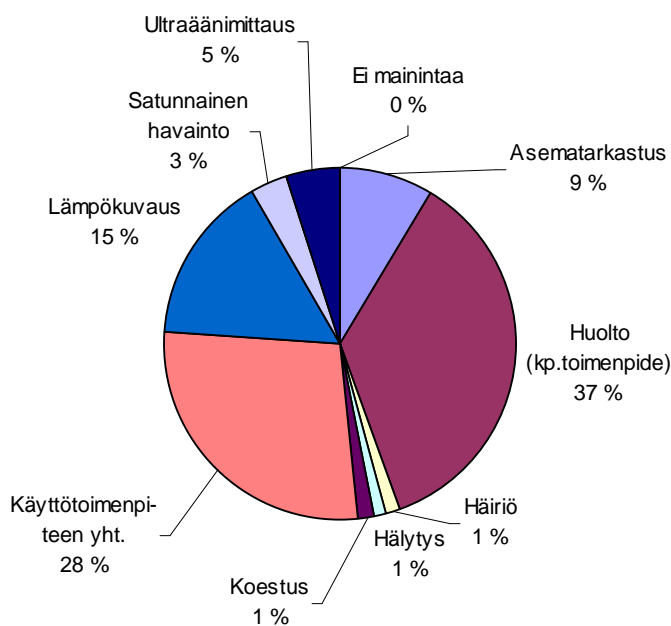
Major-luokituksen saavat siis viat, jotka vaativat erottimen välitöntä poiskytkentää tai ne, jotka estävät erottimen oikean ja turvallisen ohjauksen. Minor-vikaluokituksen saavat käytännössä kaikki muut viat.

7.3.2 Erotinvikojen havainnot

Kuvassa 7-4 on esitetty vikojen jakautuminen havaitsemistavan mukaan vuosina 1998–2006. Tarkasteluaikana 36 % vioista on havaittu huolloissa. Kaikista huolloissa havaituista vioista peräti 40 % on kuitenkin vanhojen UEV- ja UEA-tyyppisten erottimien vikoja. Seuraavaksi eniten vikoja on

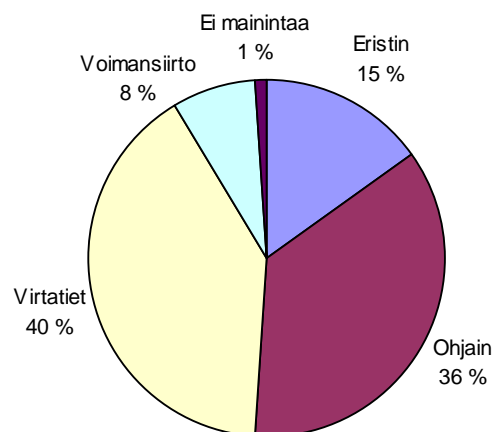
havaittu käyttötoimenpiteiden aikana. "Koestuksissa" havaitut viat voidaan lisätä tähän ryhmään, joten yhteensä kytkennöissä havaitaan noin 29 % vioista. Erottimia ei koesteta erikseen, joten kyse ei voi olla koestuksesta. Sanaa "koestus" käytetään lähinnä suojarleiden toimintakokeista.

Häiriöissä havaittuihin vikoihin kannattaa suhtautua varauksella, koska osa vioista on havaittu häiriöselvityksessä. Vioilla ei välttämättä ole tekemistä varsinaisen häiriön kanssa. Luotettavampi lähde häiriöiden tarkastelulle ovat häiriöilmoitukset. Huolloissa ja kytkennöissä havaittuja vikoja tarkastellaan vielä erikseen myöhemmin. Tartunta- ja kiertoerottimien välillä ei huomattu eroja vikojen havaitsemistavoissa. Ainoastaan käyttötoimenpiteiden yhteydessä tartuntaerottimilla havaittiin suhteessa kuusi prosenttiyksikköä enemmän vikoja. Muut erot selittyvät muutamien erottimen tyyppivioilla, jotka ovat tiedossa.



Kuva 7-4. Erotinvikojen jakautuminen havaintotavan mukaan 1998-2006.

Kuvassa 7-5 on esitetty vikojen jakautumista erottimien eri osien välillä. Virtateiden vikoja esiintyy selvästi eniten. Näitä ovat esimerkiksi koskettimien kuluminen, kohdistusviat ja lämpenemät. Kierro- ja tartuntaerottimien välillä ei havaittu merkittäviä eroja. Tarkempi listaus vikojen jakautumisesta on esitetty liitteessä 3.



Kuva 7-5. Vikojen jakautuminen erottimen eri osien kesken 1998-2006.

7.4 Katkaisijoiden viat

7.4.1 Katkaisijoiden Major- ja minor-vikaluokitukset

Katkaisijaviat jakautuvat hyvin samaan tapaan kuin erottimien viat; noin joka kymmenes on vakava Major-vika. Taulukossa 7-2 on esitetty katkaisijoiden viat.

Taulukko 7-2. Katkaisijavikojen jakautuminen luokittain.

Laitevian aste	Lukumäärä	Osuus
Major	205	10 %
minor	1707	81 %
havainto	92	4 %
ei merkintää	113	5 %
kaikki	2117	100 %

Katkaisijavika saa Major-vikaluokituksen mikäli:

- Katkaisija ei ohjaudu kiinni tai auki ohjauskäskyn saatuaan
- Katkaisija lukkiutuu
- Katkaisija ohjautuu kiinni tai auki ilman ohjauskäskyä
- Katkaisijassa on merkittävä väliainevuoto
- Katkaisutapahtuma on epäsymmetrinen tai toiminta-aika selvästi liian hidas
- Tukieristimessä on merkittävä halkeama

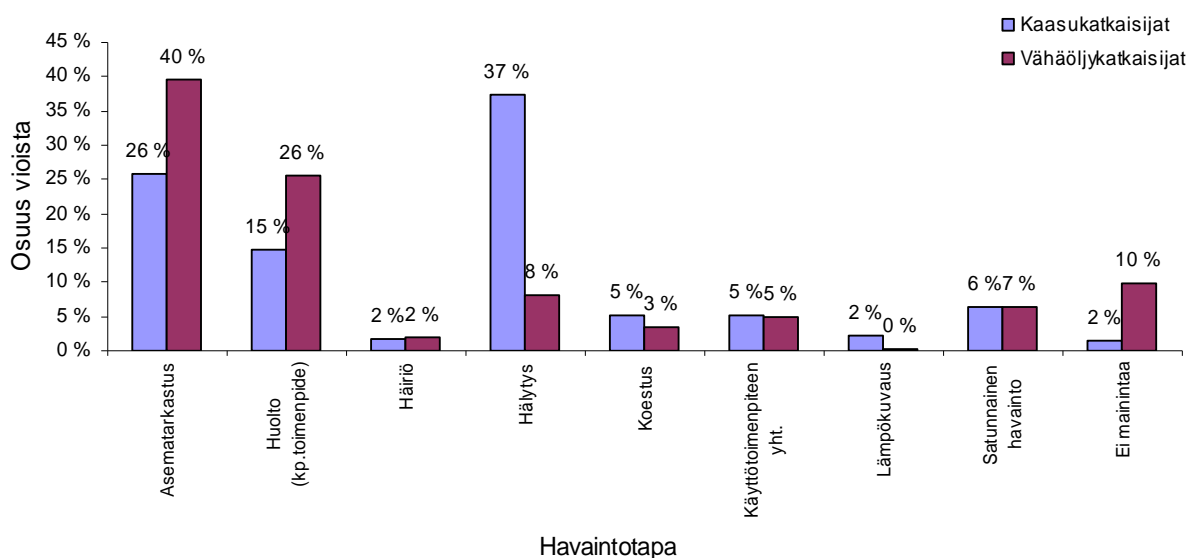
Katkaisijavika saa puolestaan minor-luokituksen esimerkiksi seuraavissa tilanteissa:

- Tukieristimessä on säröjä (ei tarvitse vaihtaa välittömästi)

- Katkaisijan kauko-ohjaus ei toimi, mutta sitä voidaan ohjata paikallisesti
- Katkaisuväliaineen määrä tai paine laskee hälytysrajan alapuolelle. Myös selvät väliainevuodot kirjataan, vaikkei hälytysrajaa vielä olisi alitettu.
- Lämmitys-, kuivausvastus tai niitä suojaava sulake palaa
- Ohjainmekaniikassa tai -piirissä on vaurioita, jotka eivät kuitenkaan edellytä katkaisijan välitöntä irtikytkentää
- Pienet öljyvuodot ohjaimessa, vaimennusjarrussa, hydraulikassa, vaihteistossa tai jännitteenjakokondensaattoreissa

7.4.2 Katkaisijavikojen havainnot

Kuvassa 7-6 on esitetty vähäöljy- ja kaasukatkaisijoiden vikojen jakautuminen eri havaintotapojen suhteen. Havaintoaineistona on nyt käytetty kaikkia vikoja vuoteen 2006 asti.



Kuva 7-6. Kaasu- ja vähäöljykatkaisijoiden laitevikailmoitusten jakautuminen havaintotavan mukaan.

Visuaaliset asematarkastukset ovat molempien katkaisijatyypin vikojen havaitsemisen kannalta erittäin tehokkaita. Vähäöljykatkaisijoiden varsin korkea osuus (40 %) asematarkastusten kohdalla selittyy pitkälti jännitteenjakokondensaattorien öljyvuodoilla, joita on asematarkastuksissa havaittu paljon.

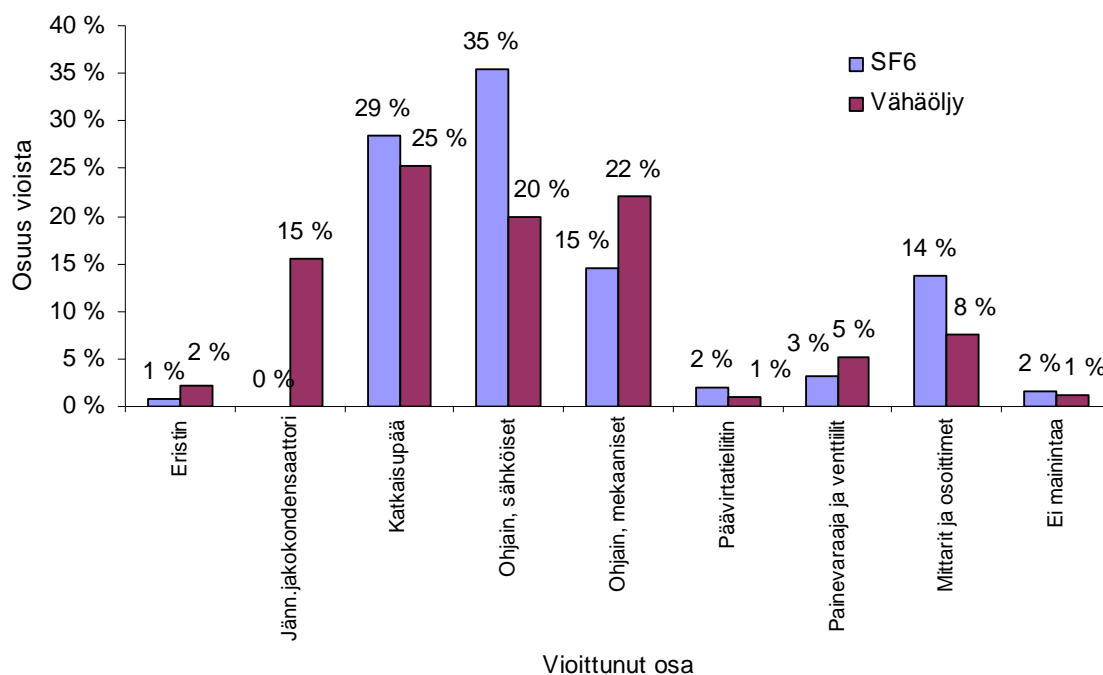
Kaasukatkaisijoille tehdään säännöllisesti vain diagnostisia mittaushuoltoja kahdeksan vuoden välein. Avaava täyshuolto tehdään vain erityistapauksissa. Mittaushuolloissa voidaan lähinnä havaita ohjainvikoja ja satunnaisesti muita vikoja. Vähäöljykatkaisijoille sen sijaan suoritetaan mittaushuoltojen lisäksi myös avaavia täyshuoltoja 12–18 vuoden välein.

Kaasukatkaisijoilla näyttäisi olevan huomattava määrä hälytyksillä havaittuja vikoja. Näistä 32 % on aiheutunut alhaisesta kaasunpaineesta, 18 % lämmityksestä, 11 % tiheysvahdin väärästä toiminnasta (asettelu tai vahingoittuminen) ja 9 % moottorisuojakytkimen viasta. Joidenkin katkaisijatyypin ongelmista huolimatta tiheysvahdit ovat osoittautuneet varsin tehokkaaksi tavaksi havaita kaasuvuodot. Tulevaisuudessa kaasun reaaliaikainen valvonta tulee lisääntymään.

Kytkennoissä havaituista vioista suurimman ryhmän muodostavat erilaiset ohjainpiirin sähköiset viat, joita molemmilla katkaisijatyypeillä on ollut noin 40 % kytkennoissä havaituista vioista.

Muita vikoja esiintyy varsin satunnaisesti. Major-vikojen osuus kytkennoissä havaituissa vioista on kaasukatkaisijoilla ollut noin 42 % ja vähäöljykatkaisijoilla peräti 53 %. Major-vikojen korkea osuus selittyy luonnollisesti sillä, että kytkennäissä katkaisijan odotetaan suoriutuvan päätoiminnostaan. Mikäli näin ei tapahdu, vika on suoraan Major-vika määritelmänsä mukaan.

Kuvassa 7-7 on esitetty puolestaan katkaisijavikojen karkea jakautuminen eri osien välille.



Kuva 7-7. SF₆ - ja vähäöljykatkaisijoiden vikojen jakautuminen eri osien suhteen.

Voimansiirto on laskettu kuuluvaksi ohjaimen mekaanisiin osiin, koska osan nimi on Elnetin viikailmoituksessa "voimansiirto/jouset", mikä hankaloittaa erottelua. Samoin "ohjain, muu osa" -merkinnät on laskettu mekaanisiin vikoihin. "Mittarit ja osoittimet" palkit pitävät sisällään asennosmittimien, öljyglasien, laskureiden ja tiheysvahtien viat. Tarkempi erittely vioista on esitetty liitteessä 1.

7.5 Keskimääräiset vikataajuudet

7.5.1 Erottimien keskimääräiset vikataajuudet

Taulukossa 7-3 on laskettu kantaverkon yleisimpien erottimien keskimääräinen vikataajuus ja viikaantumisten välinen aika vuosilta 1993–2006. Laitteiden keski-ikä on laskettu 2006 käytössä olevan laitekannan mukaisesti. Hyvin nuorilla ja kohtuullisen pienillä erotinpopulaatioilla (erityisesti SGF- ja VSSB-tyypit) laitevikatietoa on ehtinyt kertyä hyvin vähän, jolloin vikataajuus estimaatit eivät ole kovinkaan luotettavia.

Taulukko 7-3. Erottimien keskimääräiset vikataajuudet vuosilta 1993-2006.

Tyyppi	Vikataajuus [1/a]			MTBF [a]			Laitteiden keski-ikä [a]
	Major	minor	M+m	Major	minor	M+m	
OJYD	0,0009	0,0136	0,0148	1096	74	67	26
SSB	0,0032	0,0120	0,0152	311	84	66	8
OJYW	0,0009	0,0114	0,0123	1096	88	81	23
UEV	0,0038	0,0521	0,0559	265	19	18	31
OJYC	0,0023	0,0287	0,0287	426	35	35	31
GSSB	0,0020	0,0233	0,0253	502	43	39	8
TPF	0,0054	0,0374	0,0428	185	27	23	29
D300	0,0018	0,0133	0,0151	564	75	66	7
OJON	0,0051	0,0110	0,0147	197	91	68	33
FV	0,0112	0,0478	0,0590	89	21	17	30
SGF	-	0,0415	0,0415	-	24	24	4
VSSB	0,0047	0,0220	0,0267	212	46	37	4
UEA	0,0111	0,1022	0,1133	90	10	9	46
NPP	0,0013	0,0196	0,0209	742	51	48	31
TSF	0,0017	0,0256	0,0273	588	39	37	25
TVF	0,0250	0,0250	0,0536	40	40	19	30

Laitteiden keski-ikä ja kaikkien vikojen (Major- ja minor-viat) välinen korrelaatiokerroin on 0,55, mikä antaa ymmärtää, että ikääntymisellä voi olla vaikutusta vikataajuuden kasvuun.

Sen sijaan pelkillä Major-vioilla korrelaatiokerroin on vain 0,35, mikä viittaa siihen, että ikääntymismekanismeilla ei välttämättä ole havaittavaa vaikutusta Major-vikojen esiintymistiheyteen.

Korrelaatiokerroin on välillä [-1, 1] standardisoitu muuttujien kovarianssi, joka mittaa muuttujien välistä lineaarista riippuvuutta ja riippuvuus on sitä suurempi, mitä enemmän kerroin poikkeaa nolasta. Mikäli korrelaatiokerroin olisi nolla, havaintoaineisto olisi riippumaton. Korrelaatiokerroin on verrattain herkkä poikkeuksellisille äärialueilla esiintyvillä havaintoarvoilla, joten kerto-

men arvolle ei kannata antaa liian suurta painoa. Seuraavassa luvussa tarkastellaan tarkemmin ikääntymisen vaikutusta.

7.5.2 Katkaisijoiden keskimääräiset vikataajuudet

Taulukossa 7-4 on esitetty katkaisijoille vastaavat tiedot keskimääräisistä vikataajuuksista ja viikaantumisaajoista. Osa katkaisijoista on niin uusia, että tarkasteluajaväliksi on valittu 2000–2006.

Taulukko 7-4. Katkaisijoiden keskimääräiset vikataajuudet vuosilta 2000–2006

Tyyppi	Vikataajuus [1/a]			MTBF [a]			Laitteiden keski-ikä [a]
	Major	minor	M+m	Major	minor	M+m	
HGF	0,006	0,057	0,063	169	18	16	17
HPL	0,008	0,068	0,076	129	15	13	13
LTB	0,002	0,037	0,039	450	27	25	6
S1-123F1	0,028	0,189	0,217	36	5	5	6
3AP/Q	0,005	0,005	0,009	217	217	109	6
GL	0,029	0,016	0,044	35	63	23	3
ELF SL	0,037	0,355	0,392	27	3	3	22
8DN8	-	0,054	0,054	-	18	18	16
FG	0,016	0,089	0,106	61	11	9	15
FA1	0,008	0,230	0,238	126	4	4	29
ELK SL	0,012	0,179	0,190	84	6	5	19
LSEP145	-	0,051	0,051	-	20	20	10
HPF	0,009	0,174	0,183	115	6	5	32
HLR	0,018	0,107	0,125	56	9	8	26

Jos näiden tietojen pohjalta tehdään yksinkertainen korrelaatiotarkastelu, saadaan kertoimen arvoksi minor-vikojen ja laitteiden keski-ikä välille peräti 0,60. Major-vioilla ei sen sijaan näyttäisi olevan lainkaan riippuvuutta iästä; kertoimen arvo on -0,08.

7.6 Ikääntymisen vaikutus kytkinlaitteiden vikataajuuteen

7.6.1 Havaintoaineiston käsittely taulukkolaskentaohjelmassa

Ikääntymisen vaikutusta erottimien vikataajuuteen pyrittiin selvittämään Bertlingin esittämällä tavalla [Bert02]. Taulukko 7-5 ja sen jäljessä oleva selostus esittävät sovellettua menetelmää. Ylimmällä rivillä on esitetty vuosittaiset laitekannan lisäykset valmistusvuoden mukaan. Ennen vuotta 1998 kirjatut laitevikailmoitukset koskevat vain IVS:n verkkoa, minkä vuoksi lisäksi on tehty tarvittavat korjaukset, joita ovat KEJO:lta ja TVS:lta siirtyneiden erottimien sekä tietysti romutettujen laitteiden (RO) poistaminen populaatiosta [KEJO97, TVS97]. Romutettujen laitteiden määrä haarukoidaan romutusiän ja valmistusvuosien perusteella, jonka jälkeen kunkin rivin populaatiosta vähennetään kyseinen luku. Omistusvaihdosten tietoja ei saada suoraan Elnetistä, joten KEJO:n ja

TVS:n erottimet jouduin selvittämään vanhojen kauppakirjojen liitteinä olleiden verkkokaavioiden avulla ja vertaamalla niitä nykyiseen laitetietokantaan.

Taulukko 7-5. Esimerkki vikataajuus estimaatioiden muodostamisen periaatteesta MS Excelissä.

Vuositteiset lisäykset laitekantaan			L_{1970}	L_{1971}	$L_{1972}...$	$...L_{2004}$	L_{2005}
Korjaukset laitekantaan (KEJO, TVS)			K_{1970}	K_{1971}	$K_{1972}...$	$...K_{2004}$	K_{2005}
Kumulatiivinen laitekanta $C_n = L_n - K_n + C_{n-1}$			C_{1970}	C_{1971}	$C_{1972}...$	$...C_{2004}$	C_{2005}
Ikä	$\hat{v}(t)$	$N(t_i)$	1970	1971	1972...	...2004	2005
0	$N(t_0) / (C_{2005} - RO_0)$	$V_{0,1970} + ... + V_{0,2005}$	$V_{0,1970}$	$V_{0,1971}$	$V_{0,1972}...$	$...V_{0,2004}$	$V_{0,2005}$
1	$N(t_1) / (C_{2005} - RO_1)$	$V_{1,1970} + ... + V_{1,2005}$	$V_{1,1970}$				
2	$N(t_2) / (C_{2004} - RO_2)$	$V_{2,1970} + ... + V_{2,2004}$	⋮				
3	⋮	⋮	⋮				
4	⋮	⋮	⋮				
⋮	⋮	⋮	⋮				
30	$N(t_{30}) / C_{30,1976}^*$	$V_{30,1970} + ... + V_{30,1976}^*$	$V_{30,1970}$				

*) Tästä puutteellisesta kaaviosta on vaikea suoraan nähdä, että vikataajuuden estimaattorin jakajassa pitää olla vuoden 1976 kumulatiivinen laitekanta. Tämän voi todeta jatkamalla epäkelvon alueen piirtämistä

Jos esimerkiksi laitteella on havaittu vika vuonna 1973 ja laite on valmistettu vuonna 1970, laitteen ikä olisi tällöin kolme vuotta. Vika merkittäisiin siis soluun $v_{3,1970}$. Havaintovuosi on siis yksinkertaisesti pilkulla erotettujen alaindeksien summa. Tällainen havaintoaineiston käsittely edustaa luvussa 4 mainittua tyyppin IV sensuuria, jossa uudet laitteet siirretään aina nollavuoteen (origoon).

Sarakkeessa $N(t_i)$ on samanikäisillä laitteilla esiintyneiden vikahavaintojen summa. Epäkelpo alue rajaa pois mahdollittoman alueen ja osoittaa samalla, mitä lukua tulee käyttää vikataajuuden estimaattorin nimittäjässä. Esimerkiksi vuonna 2005 valmistettu laite ei voi olla yli yksivuotias, koska tarkasteluajanjakso on rajoitettu viimeisimpään kokonaiseen vuoteen 2006. Vastaavasti vuonna 2004 valmistetun laitteen ikä ei voi olla yli kahta vuotta jne. Nolla- ja yksivuotiaille laitteille käytetään vikataajuuden estimaattorin nimittäjässä tarkasteluajanjakson alusta laskettua vuoden 2005 kumulatiivista laitekantaa C_{2005} . Kaksivuotiaiden laitteiden populaatiossa ei voi olla enää mukana 2005 valmistettuja laitteita, joten nimittäjässä on C_{2004} . Näin jatkamalla saadaan aikaiseksi laitteen iän suhteen vikataajuuksien pistejoukko, jolle voidaan suorittaa trendianalyysi.

Edellä kuvatulla tarkastelutavalla on kuitenkin tämän tutkimuksen havaintoaineiston kannalta muutama heikkous. Näitä ongelmakohtia on pyritty havainnollistamaan kuvassa 7-8 esitetyllä nelikentällä.

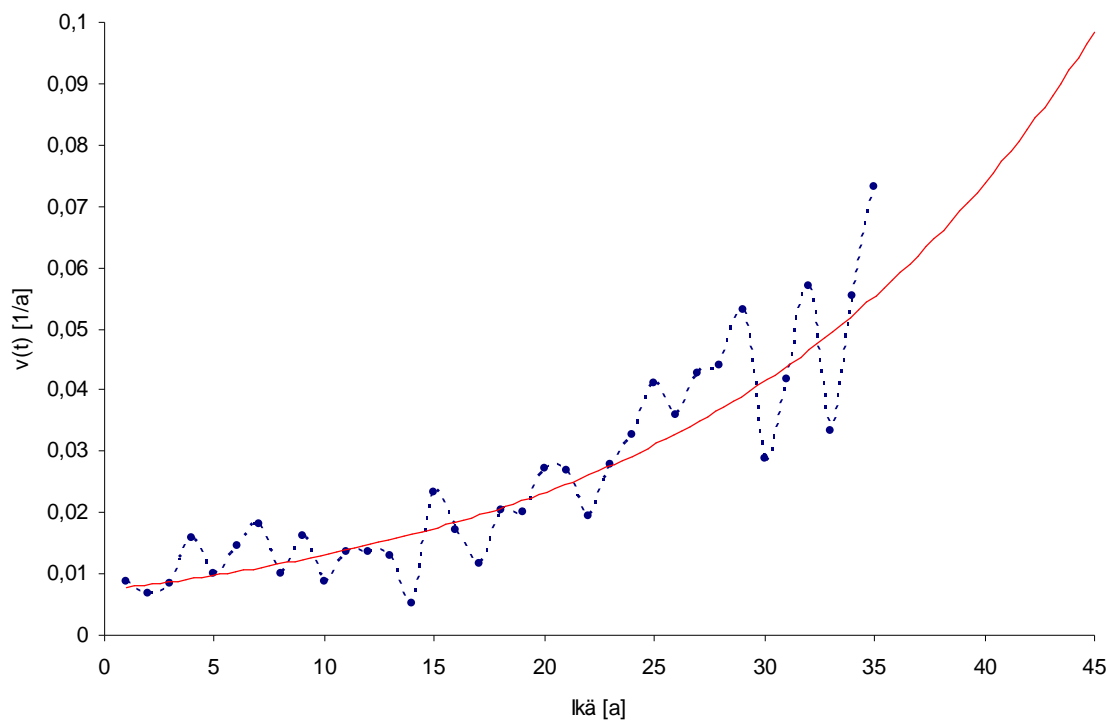


Kuva 7-8. Havaintoaineiston käsittelyn ongelmat.

Vanhoista laitteista ei ole olemassa lainkaan vikadataa niiden elinkaaren alusta, koska ensimmäiset kirjatut viat ovat vuodelta 1977. Havaintovuotta 1977 edeltävät laitevuodet on poistettu siis tarkastelusta. 1990- ja 2000-luvuilla valmistetuista laitteista on taas hyvin tietoa elinkaaren alusta ja keskivaiheilta, mutta tulevaisuuteen ei tietenkään voida nähdä. Vanhoista laitteista on taas hyvin kirjattua vikatietao aina 1990-luvulta lähtien, mutta populaation koko ja edustavuus pienenevät selvästi, kun lähestytään 30-vuoden ikää. Tämä pitää ottaa huomioon tuloksia tulkittaessa.

7.6.2 Ikääntymisen vaikutus erottimien vikataajuuteen

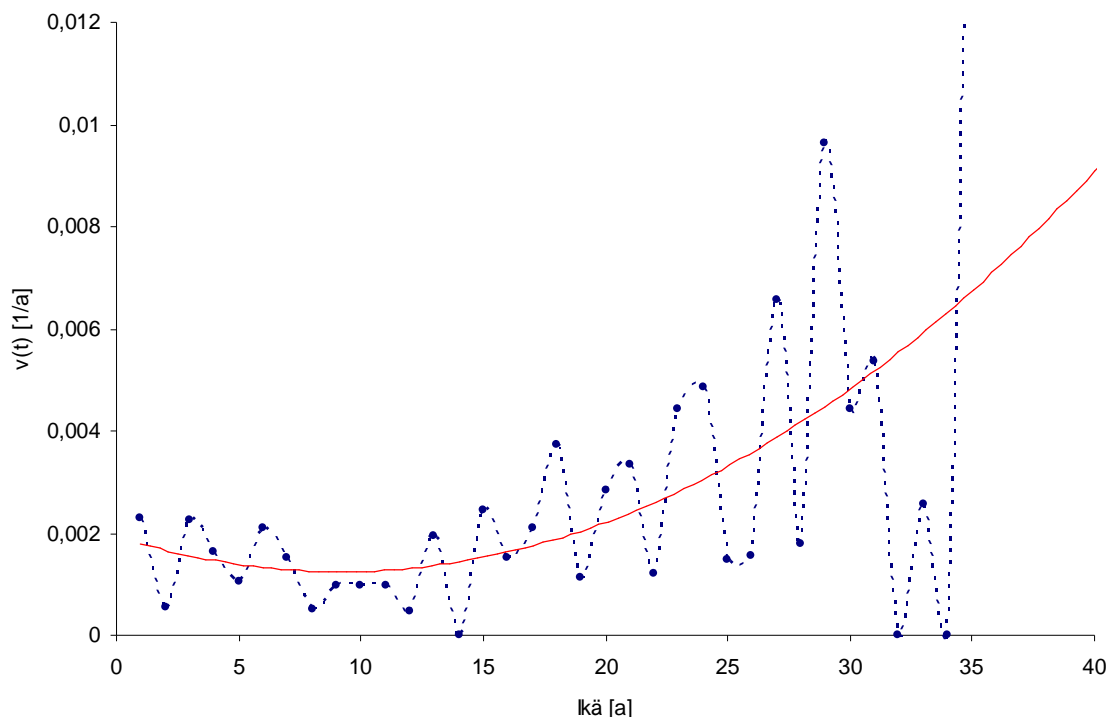
Kuvaajassa 7-9 on sovitettu havaintoarvoihin eksponentiaalinen trendikäyrä. Havainnot, eli vikataajuuden estimaattorit, on laskettu koko erotinkannan kaikista minor- ja Major-vioista vuoden 2006 loppuun asti. Sovitettu käyrä ei siis kuvaa minkään yksittäisen erotintyyppin vikataajuuden ikäriippuvuutta.



Kuva 7-9. Ikääntymisen vaikutus erottimen vikataajuuteen ($m+M$).

Kantaverkon erottimien keski-ikä oli vuonna 2006 noin 21 vuotta ja keskimääräinen vikataajuus noin 0,028 vikaa per laitevuosi, tosin vuosien välillä on hajontaa muutamia kymmenyksiä. Sovitus antaa vastaavaksi vikataajuudeksi $v(21) = 0,025$ 1/a. Mikäli erottimien keski-ikä annetaan kasvaa 30 vuoteen, käyrä ennustaisi kokonaisvikataajuudeksi 0,041 vikaa per laitevuosi. 30 vuoden keski-ikä toteutuisi nykyisellä investointi- ja perusparannustasolla lähellä vuotta 2020.

UEA-tyyppiset erottimet ovat kantaverkon vanhimpia niiden keski-ikä ollessa vuonna 2006 46 vuotta. Ekstrapoloitu vikaantumiskäyrä ennustaisi sen ikäisille vikataajuudeksi noin 0,1 [1/a], kun UEA-tyypillä vikataajuuden keskiarvo on vaihdellut viimeisenä kolmena vuotena välillä 0,08–0,12 [1/a].

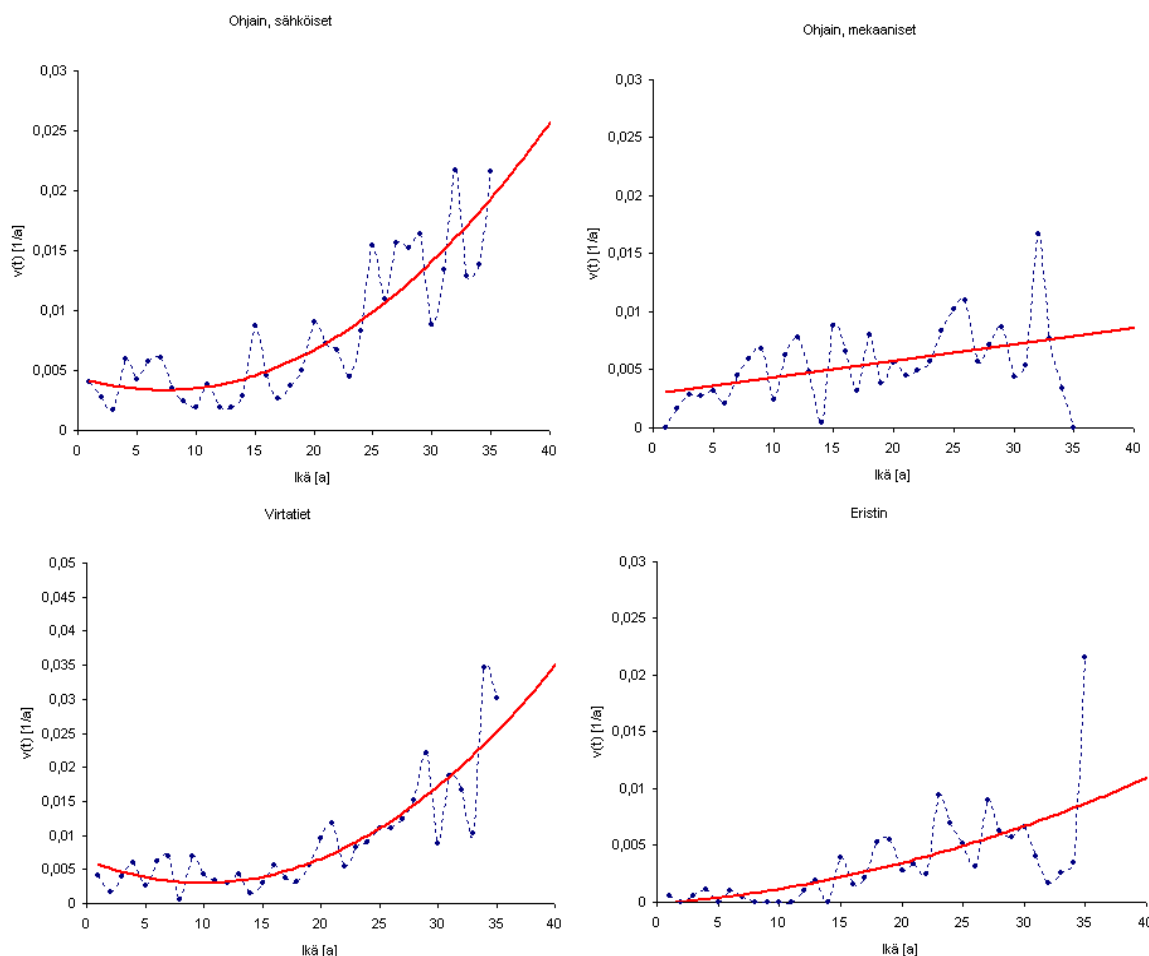


Kuva 7-10. Ikääntymisen vaikutus erottimen Major-vikataajuuteen.

län mukainen Major-vikataajuus on esitetty kuvassa 7-10. Havaintoarvoihin on sovitettu toisen asteen polynomi. Major-vikataajuuden kehittymisen ennustettavuus on selvästi huonompi kuin kaikkien vikojen, mikä näkyy hajonnan kasvuna. Ensimmäisen 15 ikävuoden aikana Major-vikataajuus pysyttelee enemmän tai vähemmän vakiona. Tämän jälkeen vakavampia eristinvikoja alkaa esiintyä joillakin erotintyypeillä. Kaikista Major-vioista

- 44 % on tukieristimen mekaanisia vaurioita,
- 17 % liikerataan vaikuttavia voimansiirron tai kosketinvarsiensa säätövirheitä ja
- 12 % rasvan puutteesta johtuvia vikoja.

Muut vikamuodot jakautuvat suhteellisen tasaisesti. Kuvassa 7-11 tarkastellaan erottimen eri osien vikataajuuden ikäriippuvuuksia. Tukieristimien viat näyttävät olevan erittäin satunnaisia ja harvinaisia ensimmäiset 12–15 vuotta. Tämä selittyy suuremmilta osin sillä, että eristimien mahdollisia vikoja on erittäin vaikea havaita silmänmääräisissä tarkastuksissa. Noin 15 vuoden ikäisinä eristimet UÄ-mitataan, jolloin mahdolliset sisäiset rakenteelliset viat paljastuvat. Eristimien vikaantuminen on kuitenkin hyvin tyyppikohtaista; osa eristimistä kestää huomattavasti paremmin ikääntymistä. Vikaantuneet tukieristimet säännönmukaisesti vaihdetaan uusiin tai mitattuihin vanhoihin eristimiin.



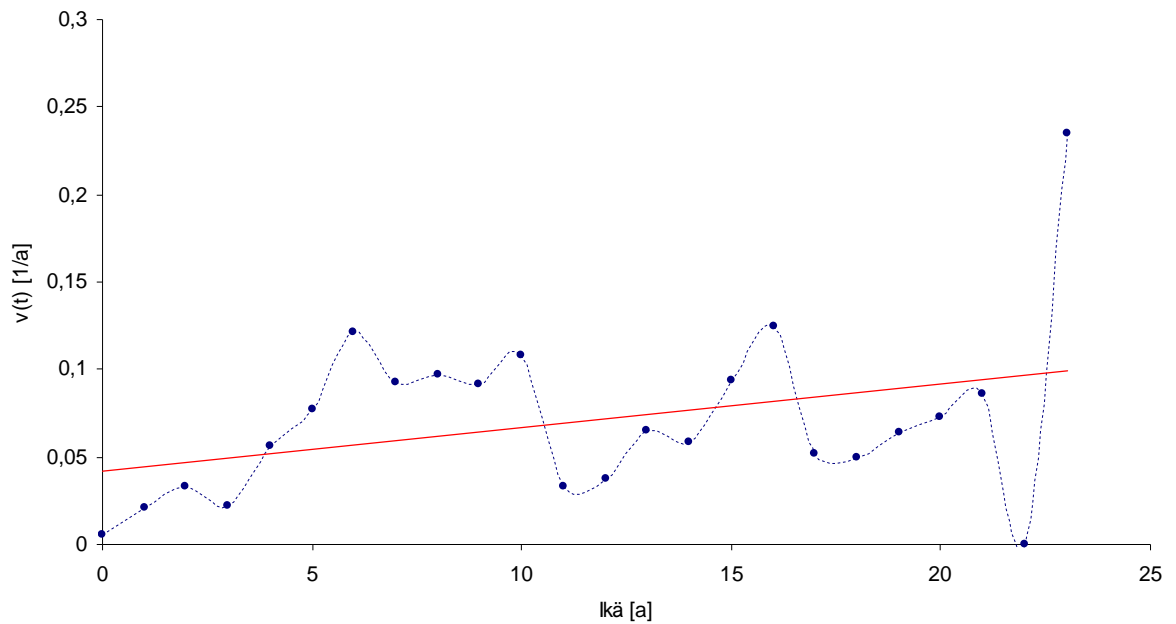
Kuva 7-11. ikääntymisen vaikutus erottimien eri osien vikataajuuteen.

Ohjainten sähköisten ja virtateiden vikojen trendikäyttäytyminen näyttää hyvin samankaltaiselta. Vikataajuus on kohtalaisen vakio ensimmäiset 15 vuotta, minkä jälkeen se alkaa kasvaa kiihtyvästi.

Ohjainten mekaanisiin vikoihin on laskettu sekä ohjaimen että voimansiirron viat. Trendianalyysi paljastaa vain pienen lineaarisen kasvun vikataajuudessa 35 vuoden aikana. Kasvu on kuitenkin sen verran vähäistä, että mekaanisten ohjainvikojen voidaan sanoa olevan riippumattomia iästä.

7.6.3 Ikääntymisen vaikutus katkaisijoiden vikataajuuteen

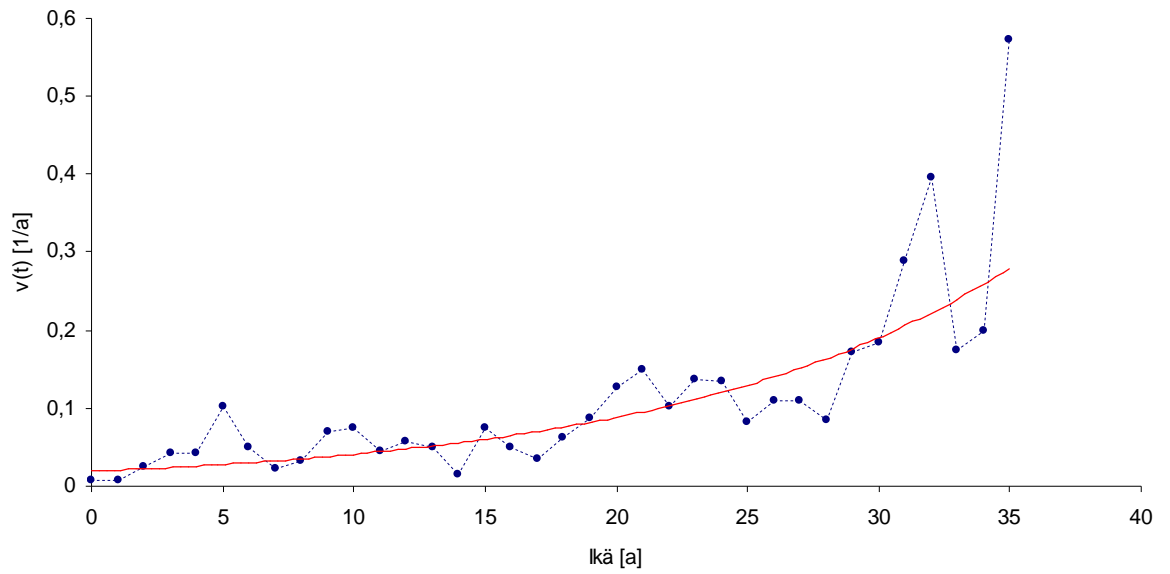
Kuvassa 7-12 on havainnollistettu kaasukatkaisijoiden vikataajuuden riippuvuutta iästä. Aineistona on käytetty Fingridin yleisimpien HGF- ja HPL-kaasukatkaisijoiden vikahavaintoja. Kyseisillä katkaisijoilla on riittävän pitkä käyttöhistoria, mutta ne eivät edusta aivan vanhinta laitekantaa. Näyttäisi siltä, että iän myötä vikataajuus ei nouse kovinkaan voimakkaasti ensimmäisten 23 vuoden aikana. Myöskään Major-vikataajuudessa ei näy mitään merkkiä trendistä, vaan vikaantuminen on täysin iästä riippumatonta. Kuriositeettina mainittakoon, että Major-vikoja ei juuri ole sattunut vuoden 1988 jälkeen valmistetuissa HGF- tai HPL-katkaisijoissa.



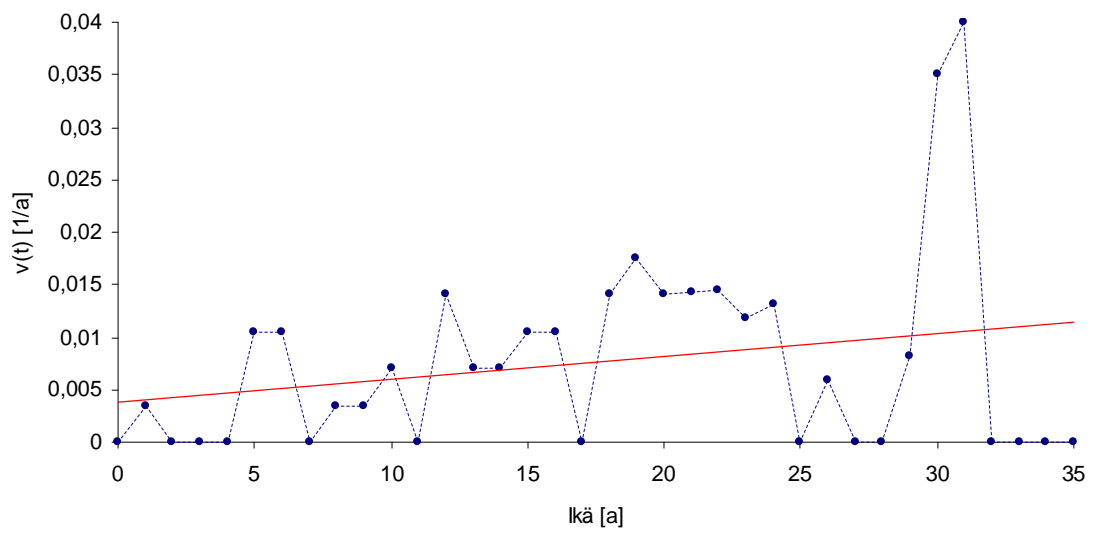
Kuva 7-12. HGF- ja HPL SF₆-katkaisijoiden ikääntymisen vaikutus (m+M) vikataajuuteen.

Valmistajat lupaavat kaasukatkaisijoille yli 30-vuoden teknistä käyttöaikaa. Fingridissä pitoaikana käytetään 40 vuotta. Vielä on kuitenkin liian aikaista ennustaa ainakaan Fingridin laitehistorian perusteella, kuinka voimakkaasti kaasukatkaisijoiden vikataajuus kasvaa 30 vuoden jälkeen.

Myös vähäöljykatkaisijoiden vikataajuuden kehittymistä on tutkittu kuvissa 7-13 ja 7-14. Kanta-verkossa on käytössä enää lähinnä kahta vähäöljykatkaisijatyyppeä HLR ja HPF, jotka muodostavat 85 % jäljellä olevista vähäöljykatkaisijoista. Aivan alkupään havaintoaineisto on hieman epätarkkaa, mutta sillä ei ole merkitystä, koska uusia vähäöljykatkaisijoita ei enää valmisteta. Kaikkien vikojen kehittymisessä näyttäisi olevan eksponentiaalisesti nouseva trendi, siinä missä Majorvikataajuudessa näkyy vain hyvin loiva keskimääräinen nousu.



Kuva 7-13. Vähäöljykatkaisijoiden HLR ja HPF (m+M) vikataajuuden ja iän välinen riippuvuus.



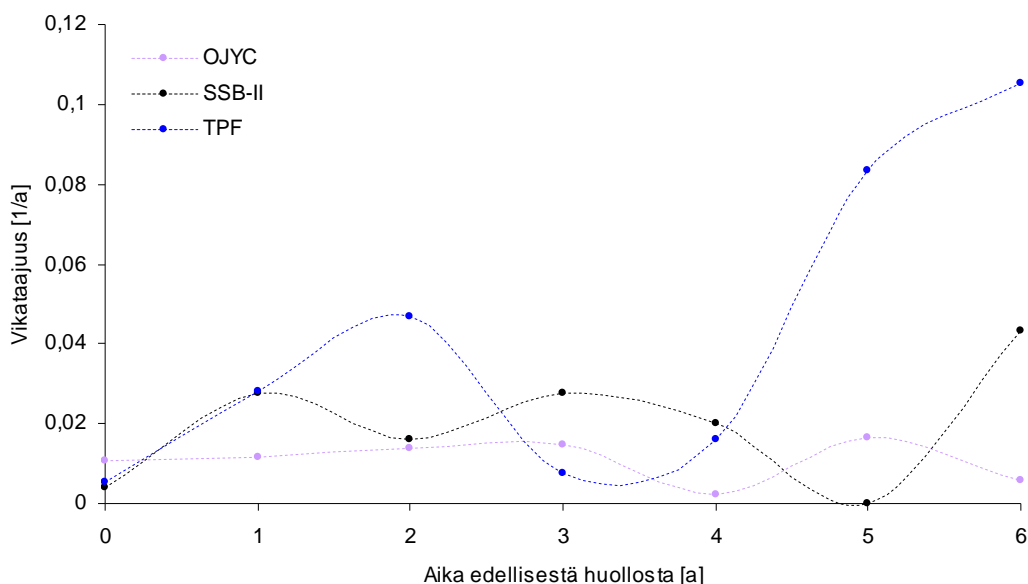
Kuva 7-14. HLR ja HPF Major-vikataajuuden kehitys.

7.7 Vikojen sijoittuminen huoltovälille

Vikojen sijoittumista kytkinlaitteiden huoltovälille arvioitiin jäljittämällä vikaantumista edeltävä ennakoiva huoltotoimenpide ja laskemalla siitä kulunut aika. Vikataajuus laskettiin suhteuttamalla vikojen määrä kyseisille laitteille tehtyjen huoltojen määrään. Ehtona siis oli, että laitteet on huollettu tarkasteluaikavälillä 1998–2006. Huollossa havaittuja vikoja ei ole mukana.

7.7.1 Erotinvikojen sijoittuminen huoltovälille

Kuvassa 7-15 on esitetty erotintyyppien OJYD, SSB-II ja TPF vikataajuuden kehitys huoltovälillä. Yhdessä kyseiset erottimet muodostavat noin 45 % koko erotinpopulaatiosta.

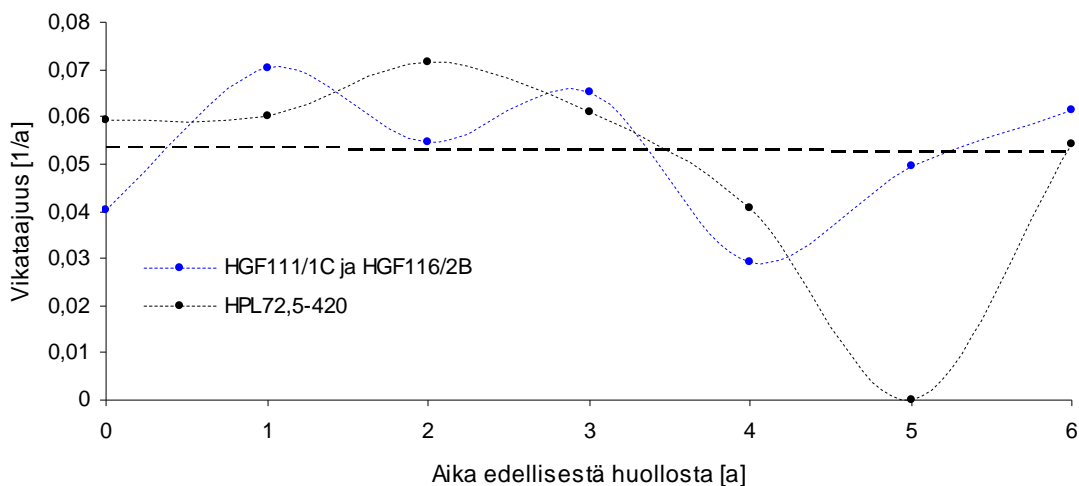


Kuva 7-15. OJYD-, SSB-II, ja TPF-tyyppisten erottimien $m+M$ vikataajuus huoltovälillä.

SSB- ja OJYD-erottimilla vikataajuus näyttäisi olevan miltei vakio, eli vikaantuminen on huoltovälillä hyvin satunnaista. TPF-saksierottimissa näkyy kuitenkin vahva nouseva trendi huoltovälin päätä kohden. Erottimien välillä on suuria eroja vikataajuuksissa. Esimerkiksi Strömbergin 1977–1988 valmistamat OJYW-polvierottimet ovat niin luotettavia, että vikojen perusteella ei voi päätellä mitään trendikäyttäytymisestä. Tällöin voidaan tyytyä tulokseen, että niillä on hyvin alhainen vakiovikataajuus. Vanhat IVO-konepajan valmistamat UEA- (keski-ikä 46 vuotta) ja UEV-tyyppiset (keski-ikä 31 vuotta) erottimet ovat puolestaan erittäin paljon huoltoa vaativia. Kyseiset erottimet huolletaan neljän vuoden välein. Erottimet, kuten GSSB, VSSB ja SGF ovat vielä niin uusia tai harvalukuisia, ettei niitä ole vielä ehditty juuri huoltaa. Major-vioilla ei ollut havaittavaa riippuvuutta edellisestä huollosta kuluneeseen aikaan.

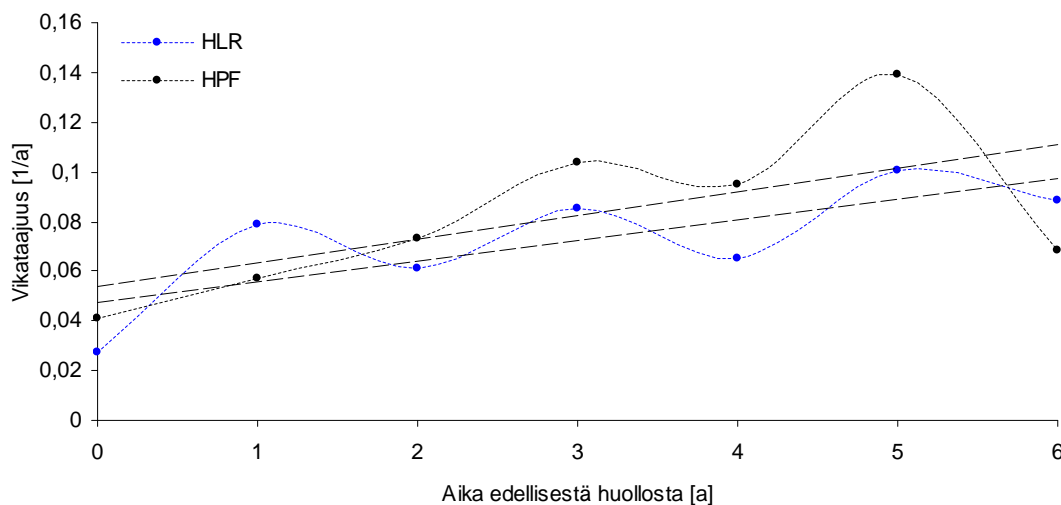
7.7.2 Katkaisijavikojen sijoittuminen huoltovälille

Kaasukatkaisijoista vain kahdella tyypillä HGF ja HPL on riittävän pitkä huoltohistoria ja laitemassa, jotta tarkastelu olisi mielekästä. Yhteensä kyseiset katkaisijatyypit edustavat noin 50 % FG:n kaasukatkaisijoista. Kuvassa 7-16 on esitetty näiden katkaisijoiden vikataajuuden kehitys huoltovälillä.



Kuva 7-16. HGF- ja HPL-kaasukatkaisijoiden vikataajuus edellisestä huollosta kuluneen ajan funktiona.

Kuvan perusteella viat ovat huoltovälillä täysin satunnaisia ja siis riippumattomia huollosta kuluneesta ajasta. Katkoviivalla piirretty trendiviiva on molemmille pistejoukoille yhteinen. Tulos ei sinänsä ole yllättävä, koska kaasukatkaisijoille ei tehdä varsinaisesti parantavaa huoltoa. Huoltovälin pidentäminen muutamilla vuosilla ei todennäköisesti vaikuttaisi vikataajuuteen mitenkään.



Kuva 7-17. HPF- ja HLR-vähäöljykatkaisijoiden vikataajuus edellisestä huollosta kuluneen ajan funktiona.

Vastaavanlainen tarkastelu on tehty HLR- ja HPF-vähäöljykatkaisijoille, joiden osuus on nykyisin 85 % kaikista vähäöljykatkaisijoista. Tulokset on esitetty kuvassa 7-17. Vastoin kuin kaasukatkaisijoilla, vähäöljykatkaisijoilla näyttäisi olevan vikataajuudessa selvästi nouseva trendi, minkä perusteella huoltovälin pidentäminen ei siis ole suotavaa. Major-vioissa sen sijaan ei näy mitään trendiä. Niiden sijoittuminen huoltovälille on täysin satunnaista.

7.8 Huollossa havaitut viat

Edellä tarkasteltiin huoltovälille sijoittuneita vikoja, mutta ei varsinaisessa huollossa havaittuja vikoja. Taulukossa 7-6 on esitetty erotinhuolloissa kirjattujen vikailmoitusten määrät ja niiden suhteellinen osuus tehtyihin huoltoihin nähden.

Taulukko 7-6. Erotinhuolloissa kirjatut laitevikailmoitukset.

Vuosi	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	Kaikki yhteensä
Huollossa havaitut viat yhteensä	18	30	40	21	37	24	43	36	28	277
Huollossa havaitut Major-viat	2	0	1	1	0	1	2	1	1	9
Huoltojen määrä	306	167	255	456	455	521	510	296	198	3164
Huolloissa havaittujen vikojen määrä / huoltojen määrä	6 %	18 %	16 %	5 %	8 %	5 %	8 %	12 %	14 %	9 %
Huollossa havaittujen Major-vikojen määrä / huoltojen määrä	1 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	1 %	0,3 %

Taulukon tulokset antavat kohtalaisen huonon kuvan ennakoivan erotinhuollon tehokkuudesta. Keskimäärin vain 9,3 % huolloista havaitaan vikoja. Major-vikojen pieni osuus ei sinänsä ole yllätyksellinen, koska niiden korjaamisen lykkääminen huoltoon ei ole mahdollista. Toinen selittävä tekijä Major-vikojen pienelle osuudelle on inhimillinen: huolloissa havaittuja vikoja ei välttämättä kirjata vakaviksi vioiksi yhtä helposti kuin esimerkiksi kytkentätoimenpiteen yhteydessä havaittuja.

Taulukoissa 7-7 ja 7-8 on esitetty vastaavat tiedot kaasu- ja vähäöljykatkaisijoista. Kaasukatkaisijoiden huolloissa vikojen jakautuminen minor- ja Major-vikoihin näyttää samanlaiselta kuin erottimilla. Vähäöljykatkaisijoilla huolloissa on havaittu suhteessa 5 % enemmän vikoja.

Taulukko 7-7. SF6-katkaisijoiden mittaushuolloissa kirjatut laitevika-ilmoitukset.

Vioittunut osa	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	Kaikki yhteensä
Huollossa havaitut viat yhteensä	2	2	19	7	5	5	12	5	4	61
Huollossa havaitut Major-viat			1						1	2
Huoltojen määrä	69	46	98	131	92	36	52	66	27	617
Huolloissa havaittujen vikojen määrä / huoltojen määrä	3 %	4 %	19 %	5 %	5 %	14 %	23 %	8 %	15 %	10 %
Huollossa havaittujen Major-vikojen määrä / huoltojen määrä	0 %	0 %	1 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	4 %	0,3 %

Taulukko 7-8. Vähäöljykatkaisijoiden huolloissa kirjatut laitevika-ilmoitukset.

Vioittunut osa	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	Kaikki yhteensä
Huollossa havaitut viat yhteensä	11	18	8	20	14	0	3	22	18	114
Huollossa havaitut Major-viat	2	1			2		1	1	1	8
Huoltojen määrä	127	132	85	126	78	67	19	65	73	772
Huolloissa havaittujen vikojen määrä / huoltojen määrä	9 %	14 %	9 %	16 %	18 %	0 %	16 %	34 %	25 %	15 %
Huollossa havaittujen Major-vikojen määrä / huoltojen määrä	2 %	1 %	0 %	0 %	3 %	0 %	5 %	2 %	1 %	1,0 %

7.9 Kytkennoissä havaitut viat

Taulukossa 7-9 on esitetty vuosina 1998–2006 kytkennoissä havaitut viat. Kytkennoillä ei tässä yhteydessä tarkoiteta yksittäisen laitteen ohjausta vaan kokonaista keskeytystä, joka voi sisältää useita erillisiä ohjauksia eri asemilla.

Taulukko 7-9. Kytkennoissä havaitut viat vuosina 1998–2006.

Vuosi	Erottimet			Katkaisijat			Osuus kytkennoistä			
	Major	minor	minor haittaavat	Major	minor	minor haittaavat	Kytkennojen määrä	Major	minor	M+m haittaavat
1998	4	14	5	2	3	1	821	0,73 %	2,1 %	1,5 %
1999	7	12	8	5	3	0	777	1,54 %	1,9 %	2,6 %
2000	3	14	8	2	0	2	833	0,60 %	1,7 %	1,8 %
2001	4	26	18	0	0	0	1094	0,37 %	2,4 %	2,0 %
2002	3	20	14	8	7	0	1265	0,87 %	2,1 %	2,0 %
2003	6	20	16	4	3	1	1072	0,93 %	2,1 %	2,5 %
2004	4	19	13	1	4	2	972	0,51 %	2,4 %	2,1 %
2005	5	24	14	4	4	2	929	0,97 %	3,0 %	2,7 %
2006	4	21	17	4	0	0	890	0,90 %	2,4 %	2,8 %
yhteensä	40	170	113	30	24	8	8653	0,81 %	2,2 %	2,2 %

"Minor haittaavat" -vioilla tarkoitetaan tässä sellaisia lieviä vikoja, jotka olisivat mahdollisesti estäneet kytkinlaitteen kaukokäytön mutta eivät paikalliskäyttöä. Suuri osa näistä on ohjainpiirin sähköisiä vikoja. Keskimäärin noin kahdeksassa kytkennässä tuhannesta kytkinlaite ei toimi kytkennän aikana. Sellaisia kytkentöjä, joissa etäkäyttö ei olisi mahdollista, on noin kaksi sadasta.

Erotinvikojen esiintyminen kytkentätilanteissa ei yleensä tuota ylivoimaisia ongelmia, mikäli kytkettäessä asemalla on henkilökuntaa paikalla. Suunnitelluissa kytkennöissä näin onkin, koska ohjaukset on varmistettava visuaalisesti. Tulevaisuudessa olisi kuitenkin tavoitteena käyttää kameroita varmentamaan kytkentöjen onnistuminen, jolloin erottimelta vaaditaan virheetöntä toimintaa. Käsien ohjaus tai pienten korjaustoimenpiteiden, kuten lukituksen mekaaninen vapauttaminen eivät silloin ole mahdollisia ainakaan lyhyellä vasteajalla.

7.10 Kytkinlaitteiden aiheuttamat käyttöhäiriöt

7.10.1 Erottimien käyttöhäiriöt 1998–2006

Fingridin omistamille erottimille on kirjattu 1998–2006 yhteensä viisi käyttöhäiriötä, joista neljä on ollut 110 kV ja yksi 20 kV jänniteportaassa. Häiriö- ja laitevikatietojen analyysin perusteella voidaan laskea seuraavat tunnusluvut:

- Häiriötaajuus: 0,0001831 häiriötä / laitevuosi
- Häiriö kerran 5462 vuodessa
- P(Aiheuttaa häiriön elinkaarensa (40 vuotta) aikana) = 0,73 %
- Aikavälille tasoitettu TJSA = 30 369 €/ vuosi

Häiriötaajuus on laskettu suhteuttamalla häiriöt aikavälin erotinpopulaatioon. Edellisistä häiriöistä vain yksi aiheutui vanhenemisestä ja yksi valmistusvirheestä. Muut viat olivat laitteen ulkopuolisia: kaksi oli työvirheitä ja yksi eläimen aiheuttama. Lisäksi on täsmennettävä, että 400 kV erottimien aiheuttamat häiriöt ovat erittäin harvinaisia eikä tarkasteluajavälillä havaittu yhtäkään. Todellinen erottimien aiheuttama häiriötaajuus on siis vielä yli puolet pienempi niin, että häiriön aiheuttava vika esiintyy keskimäärin kerran 13 650 vuodessa yhdellä erottimella.

Vakavin häiriön aiheuttanut vika sattui Kymminlinnassa, jossa tukieristimen katkeamisen seurauksena, erotin kaatui toista erotinta päin aiheuttaen maasulun. Toimittamatta jääneen sähköenergian nykyarvo oli noin 239 000 €, mikä on selkeästi suurin yksittäisen erottimen aiheuttama kustannus. Toinen vika, josta aiheutui merkittäviä siirron menetyksiä, tapahtui erotinasemalla. Työvirheestä aiheutunut erottimen kosketinvarsien kohdistusvian korjaus vaati johtokeskeytyksen. Toimittamatta jääneen sähköenergian arvo oli noin 29 400 €. Tämäkään ei siis ollut laitteesta johtuva vika.

7.10.2 Katkaisijoiden käyttöhäiriöt 1998–2006

Fingridin omistamat katkaisijat ovat aiheuttaneet suoraan 15 käyttöhäiriötä ja laajentavia vikoja on ollut saman verran. Laajentavat viat eivät aiheuta häiriötä, mutta ne kirjaimellisesti laajentavat sitä tai hankaloittavat häiriön hallintaa. Siirtojännitteillä häiriön aiheuttaneita vikoja on ollut 24 ja loput kuusi 10 tai 20 kV jännitteillä. Häiriöistä 19 on ollut pysyviä ja 10 jälleenkytkennällä hävinneitä. Yhdestä ei ole tietoa.

Katkaisijoille kirjatuille käyttöhäiriöille voidaan laskea seuraavat tunnusluvut:

- Häiriötaajuus: 0,0035 häiriötä / laitevuosi
- Häiriö kerran 287 vuodessa
- $P(\text{Aiheuttaa häiriön elinkaarensa (40 vuotta) aikana}) = 14 \%$
- Aikavälille tasoitettu TJSA = 77 000 €/ vuosi

Luvuista on helppo nähdä, että katkaisijoiden häiriötaajuus on erottimia suurempi. Pieneltä näyttävä ero katkaisijoiden ja erottimien TJSA:ssa selittyy pitkälti aikaisemmin mainitulla Kymminlinnan erotinvialla. Häiriön aiheuttaneista katkaisijavioista 20 oli laitteen itsensä aiheuttamia ja loput ulkopuolisia. Jos vain laitteen aiheuttamat viat lasketaan, häiriöiden välinen keskimääräinen aika olisi yli 400 vuotta yhdellä laitteella.

8 Kunnossapitotietojen analyysi

8.1 Yleistä

Tässä osiossa tarkastellaan Elnetin "asemakunnossapito" -sovellukseen kirjattuja tietoja, joita ovat esimerkiksi erilaiset kunnonvalvonnan mittaukset sekä vapaamuotoiset lisätiedot. Periaatteessa jokaisesta huollosta havaitusta puutteesta tulisi tehdä laitevikailmoitus, mutta näin ei aina ole toimitettu. Mittauksilla saadaan suoraan numeroarvoista tietoa laitteen kunnosta, jota voidaan käyttää laitevikatietojen rinnalla. Luvussa tarkastellaan myös huoltojen ja vikakorjausten määriä.

8.2 Huolloissa kirjatut lisätiedot

Lisätiedot sisältävät vastaavanlaista tietoa kuin laitevikailmoitusten vapaamuotoiset vika- ja korjausselostukset, mutta niissä on omat ongelmansa:

- Lisätiedot ovat täysin vapaamuotoisia
- Lisätietoja ei ole kirjattu jokaisessa huollosta

Lisätietojen läpikäyminen ja vertaaminen huolloissa tehtyihin laitevikailmoituksiin on silti perusteltua varsinkin kontrollimielessä.

Lisätietoja on kirjattu 1998–2006 noin 47 % erotinhuolloista, 44 % kaasukatkaisijahuolloista ja 52 % vähäöljykatkaisijoiden huolloista. Jotain huomautettavaa oli erottimilla noin 19 % kaikista huolloista. Kaasukatkaisijoilla vastaava luku oli 12 % ja vähäöljykatkaisijoilla 42 %.

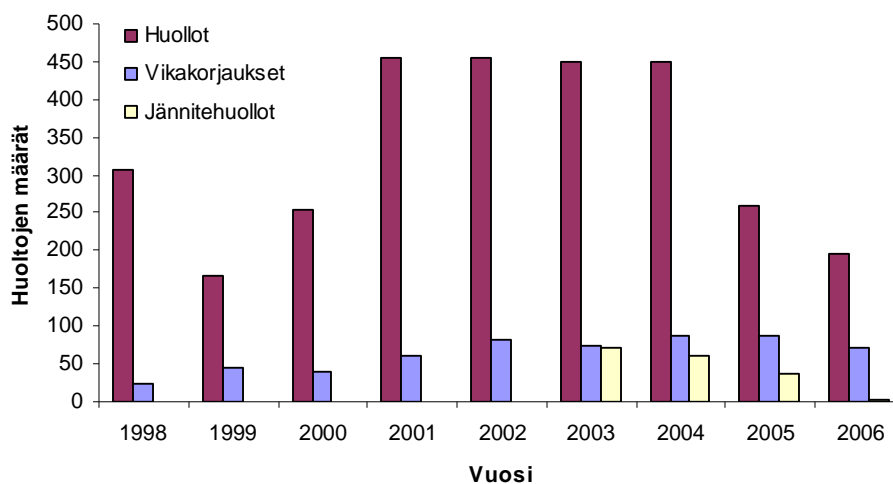
Tietoja analysoitaessa huomautus-merkintä annettiin hyvin alhaisella kynnyksellä. Huomautusten jakautuminen eri osien suhteen on pitkälti samanlaista kuin laitevikatiedoissa. Lisätietokenttä on pakollinen täytettävä, mutta tällä hetkellä täyttöaste on alle puolet. Toisaalta ohjeissa ei lue, että lisätietokenttään pitäisi kirjata "ei huomautettavaa", jolloin jää epäselväksi, onko kenttä jätetty tarkoituksella vai epähuomiossa tyhjäksi.

Huoltojen lisätiedoilla on päällekkäinen rooli laitevikatietojen kanssa, mikä ei ole suotavaa. Kaikista huolloista havaituista puutteista tulee tehdä laitevikailmoitus, joten periaatteessa huollon lisätiedot ovat turha kenttä. Pahimmillaan voi käydä niin, että jostain puutteesta ei tehdä erikseen laitevikailmoitusta, jos se on jo mainittu lisätiedoissa.

8.3 Erotinhuollot

8.3.1 Erotinhuoltojen määrän kehittyminen 1998–2006

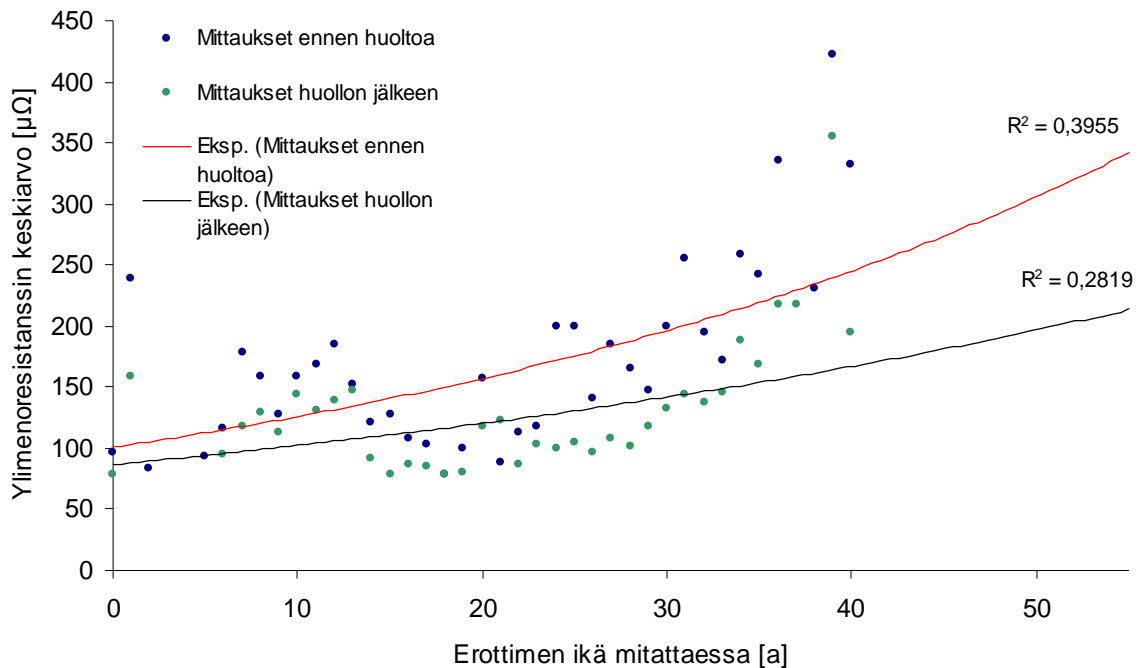
Kuvassa 8-1 on esitetty erotinhuoltojen absoluuttimäärät Fingridin historian aikana. Vaalean keltaisella näkyviä jännitehuoltoja ei toistaiseksi tehdä palvelutoimittajien korkean hinnoittelun vuoksi. Siksi jännitehuoltoja ei näy vuonna 2006. Huoltomäärissä tulee helposti eroja eri vuosien välillä, jos huoltoja sattuu useammalle isolle kytkinlaitokselle samana vuonna.



Kuva 8-1. Aikaperustaisten erotinhuoltojen ja vikakorjausten määrät.

8.3.2 Erottimien ylimenoresistanssin mittaukset

Erottimille suoritetaan huoltojen yhteydessä ylimenoresistanssimittaukset toimenpiteitä ennen ja jälkeen. Elnetin Huolto-sovellukseen on vuodesta 2000 alkaen kirjattu 6138 ylimenoresistanssi mittausta. Näitä mittauksia voidaan käyttää virtateiden kunnon sekä huollon vaikutusten arviointiin. Alla olevat mittaukset on tehty liittimien kanssa.



Kuva 8-2. Ylimenoresistanssin keskimääräinen kehitys.

Tarkastelemalla kuvassa 8-2 esiintyviä koko erotinpopulaatioon liittyviä mittauksia ja trendiviivoja voi ikääntymisen ja ylimenoresistanssin kehityksen välillä nähdä yhteyden. Ylimenoresistanssin ylärajaksi on määritelty yleensä liittimien kanssa noin 200-300 $\mu\Omega$ hieman erotintyyppistä riippuen. Kuvaajasta voidaan havaita seuraavat asiat:

- Nykyisellä huoltovälillä ennen huoltoa mitattu ylimenoresistanssi pysyy keskimäärin sallituissa rajoissa ensimmäisten 30 vuoden aikana.
- Huoltotoimenpiteillä voidaan ylimenoresistanssi palauttaa käytännössä aina sallittuihin rajoihin, koska ylimenoresistanssi huollon jälkeen kasvaa erittäin hitaasti.
- Huoltotoimenpiteillä ei näyttäisi olevan ensimmäisen 20 vuoden aikana keskimäärin kovinkaan suurta vaikutusta ylimenoresistanssin parantumiseen (punaisen ja mustan trendiviivan välinen alue)

Tutkittaessa tarkemmin yleisimpien erotintyyppien ylimenoresistanssien trendejä, huomattiin merkittäviä eroja eri erottimien välillä. Kaikkein nopeimmin ylimenoresistanssi nousi TPF- ja GSSB-tyyppisissä saksierottimissa. TPF-erottimien virtatiet onkin todettu huonokuntoisiksi ja niille suoritetaan tätä kirjoitettaessa täyshuoltoja.

Erottimien ylimenoresistanssin trendejä olisi mahdollista käyttää hyödyksi huoltojen kohdentamisessa lajikohtaisesti. Tiettyjen erottimien huoltoväliä voitaisiin selvästi kasvattaa ja toisilla lyhentää. Kuvat lajikohtaisista ylimenoresistanssien trendeistä on esitetty liitteessä 5. Ylimenoresistanssi

ei kuitenkaan ilmaise koko totuutta virtateiden kunnosta. Myös kohdistusviat pitää ottaa huomioon huoltoväliä määritettäessä.

Samassa yhteydessä tarkasteltiin myös erottimen roolin vaikutusta keskimääräiseen ylimenoresistanssiin. Koko erotinpopulaation mittauksiin perustuvat tulokset on esitetty taulukossa 8-1. Tarkempi lajikohtainen listaus on esitetty liitteessä 5.

Taulukko 8-1. Keskimääräiset ylimenoresistanssit ennen huoltoa ja sen jälkeen erottimen roolin mukaan.

ROOLI	Keskimääräinen ylimenoresistanssi ennen huoltoa [$\mu\Omega$]	Keskimääräinen ylimenoresistanssi huollon jälkeen [$\mu\Omega$]	Suhteellinen parannus keskimäärin
JOHTOEROTIN	129	111	16 %
MUUNTAJAEROTIN	179	131	37 %
KISKOEROTIN	182	120	52 %
OHIKYTKENTÄEROTIN	202	128	58 %
TÄHTIPISTE-EROTIN	231	194	19 %

Muuntajaerottimet ovat keskimäärin kovimmalla kuormalla. Tällä ei kuitenkaan näyttäisi olevan vaikutusta ylimenoresistanssiin ennen huoltoa. Sen sijaan huollon jälkeinen ylimenoresistanssi on hieman korkeampi kuin muissa rooleissa olevilla erottimilla. Kuormituksella saattaa siis olla pieni vaikutus koskettimien kuntoon.

OhikytKentäerottimet ovat tavallisesti auki -asennossa, jolloin rasva pääsee kuivumaan ja ylimenoresistanssi kasvaa. Tyypillisesti muutama ohjauskerta riittää irrottamaan epäpuhtaudet koskettimista [Kas07]. Huollon jälkeinen resistanssi näyttäisi ohikytKentäerottimilla jäävän hieman koholle verrattuna johtoerottimiin.

8.3.3 Erottimien kuntoarviot

Erottimien yleistä kuntoa on alettu arvioimaan vuodesta 2006 alkaen tarkoituksena selvittää, missä kunnossa erotinkanta on ennen huoltoa. Arvion antaa huoltohenkilöstö oman asiantuntemuksensa pohjalta ja se on siis subjektiivinen. Arviointi tapahtuu asteikolla yhdestä neljään, jossa arvosana

1 = huono

2 = tyydyttävä

3 = hyvä

4 = erinomainen

Arvioitavina osina ovat teräsrakenteet, pääkoskettimet, ohjainvivusto, ohjaimen mekaniikka ja sähköiset osat, eristimet, liitäntälaakerit ja liittimet. Yhteensä kuntoarvioita on tehty 29.6.2007

mennessä noin 180 laitteelle. Otos on sen verran pieni, ettei sen perusteella vielä kannata tehdä arvioita tyyppikohtaisesti, mutta koko kantaverkon erotinkannasta se antaa jonkinlaisen käsityksen. Otoksen edustavuus on noin 5,6 % koko erotinpopulaatiosta. Tulokset on esitetty taulukoissa 8-2 ja 8-3.

Taulukko 8-2. Erottimien kuntoarviot ennen huoltoa.

Arvioitava osa	Keskiarvo	Keskihajonta
Eristimet	3,5	0,57
Liittimet	3,2	0,74
Ohjainmekaniikka	3,3	0,67
Ohjaimen sähköiset osat	3,4	0,65
Ohjausvivusto	3,2	0,73
Pääkoskettimet	3,1	0,75
Teräsrakenteet	3,3	0,64
Kaikki yhteensä	3,3	0,69

Taulukko 8-3. Kuntoarvioiden arvosanjakauma.

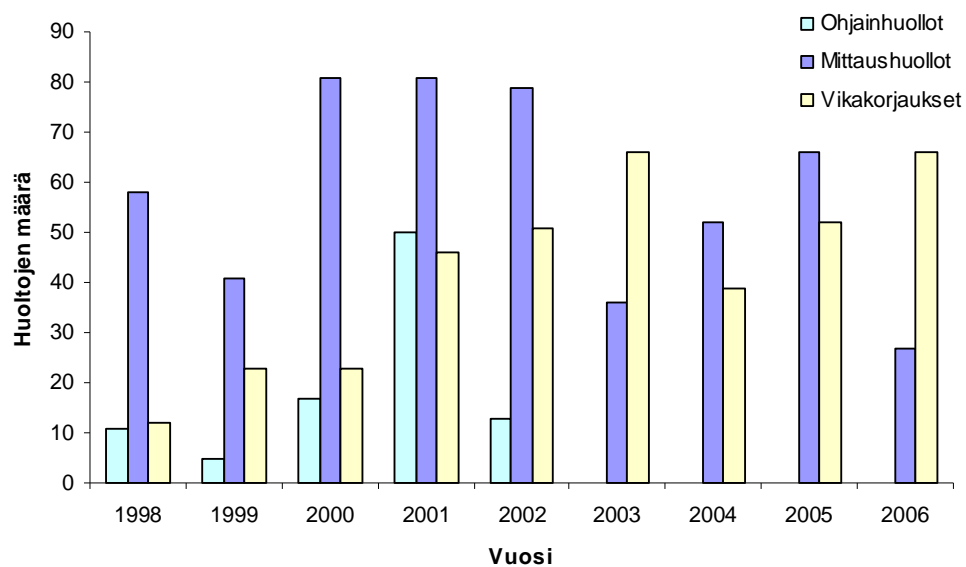
Kuntoarvio	Lkm	Osuus
1	28	2 %
2	77	6 %
3	656	53 %
4	480	39 %
Yhteensä	1241	100 %

Arvioiden perusteella siis 92 % kantaverkon erottimista on hyvässä tai erinomaisessa kunnossa ennen huoltoa. Tämä havainto korreloi huolloissa havaittujen laitevikojen pienen määrän kanssa.

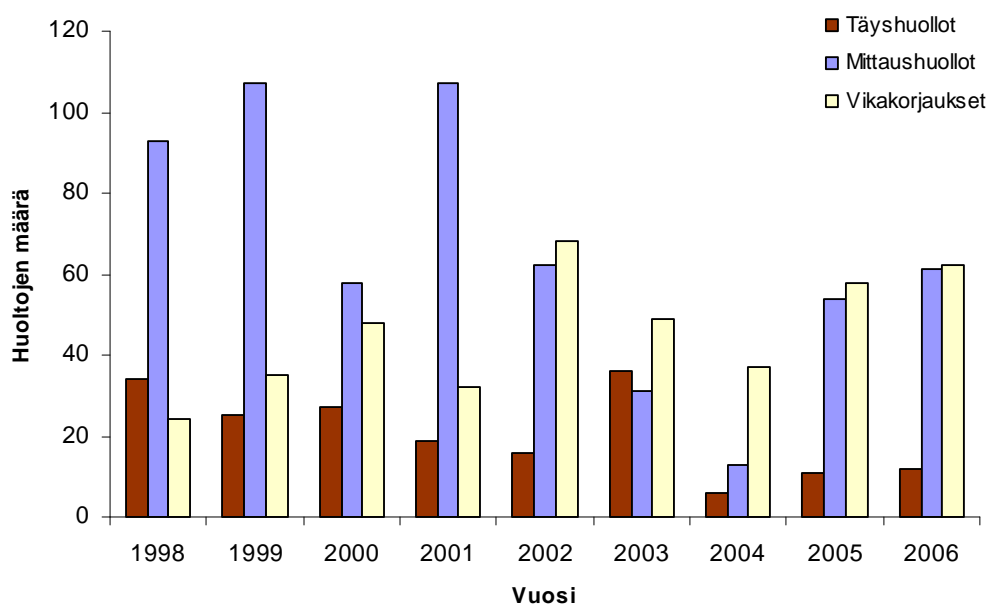
8.4 Katkaisijahuollot

8.4.1 Huoltomäärien kehittyminen 1998–2006

Kuvissa 8-3 ja 8-4 on esitetty kaas- ja vähäöljykatkaisijoiden huoltomäärien kehitys vuosina 1998–2006. Kaasukatkaisijoiden ohjainhuollot sisällytettiin mittaushuollon laajuuteen 2003 alkaen. Samalla muutettiin toimenpiteen nimeksi "huolto". Laajuus vastaa kutakuinkin vähäöljykatkaisijan mittaushuoltoa, joten selvyiden vuoksi tässä käytetään ilmaisua mittaushuolto.



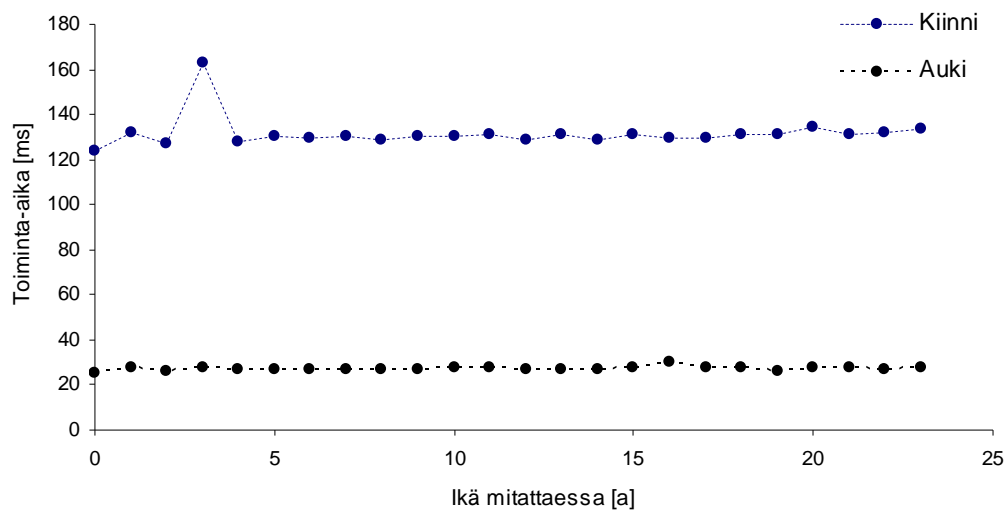
Kuva 8-3. SF6-katkaisijoiden huoltojen ja vikakorjausten määrät vuosina 1998-2006.



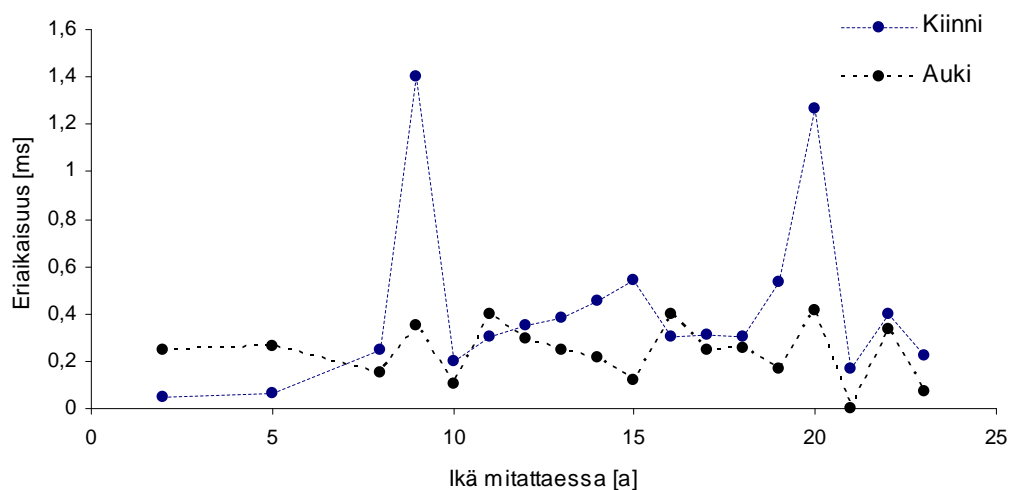
Kuva 8-4. Vähäjykatkaisijoiden huoltojen ja vikakorjausten määrät vuosina 1998-2006.

8.4.2 Toiminta-aikamittaukset

Katkaisijoiden mittaushuolloissa mitataan auki- ja kiinnimenoajat sekä vaiheiden eriaikaisuus. Toiminta-aikojen on pysyttävä valmistajien antamissa rajoissa. Erityisesti napojen välistä eriaikaisuutta ei saa esiintyä. Kuvassa 8-5 on esitetty esimerkkinä eri-ikäisten HGF111/1C-tyyppisten SF₆-katkaisijoiden keskimääräisiä toiminta-aikoja. Auki- ja kiinnimenoajat pysyttelevät hyvinkin tarkkaan annetuissa rajoissa eikä mitään trendiä näytä esiintyvän. Alemmassa kuvassa 8-6 on esitetty puolestaan vaiheiden välinen eriaikaisuus.



Kuva 8-5. HGF111/1C-kaasukatkaisijan toiminta-ajat.



Kuva 8-6. HGF111/1C-kaasukatkaisijan napojen eriaikaisuus.

Mittaustulokset on kuvissa keskiarvostettu, mutta hajonta oli hyvin pientä. Keskihajonta HGF111-katkaisijoiden eriaikaisuudessa oli auki-ohjauksissa 0,19 ms ja kiinniohjauksissa 0,47 ms. Suurin mitattu eriaikaisuus kyseisellä katkaisijalla oli sulkeutumisessa 2,2 ms ja aukaisussa 0,8 ms. Korkein sallittu eriaikaisuus on noin 3 ms.

Missään muussakaan katkaisijatyypissä ei esiintynyt mitään trendejä toiminta-ajoissa, mutta eri tyyppien välillä on luonnollisesti jonkin verran eroa. Eriaikaisuutta ei myöskään esiintynyt. Mittaustiedon perusteella katkaisijat ovat mitattaessa olleet lähes poikkeuksetta toiminta-arvojen sisällä.

8.4.3 Ylimenoresistanssimittaukset

Katkaisijahuoltojen yhteydessä tehdään ylimenovastusmittaus, jonka tarkoituksena on selvittää koskettimien kunto tai mahdolliset asentovirheet. Korkeinta sallittua ylimenoresistanssin nousua voidaan arvioida esimerkiksi valmistajan antamilla ohjearvoilla tai laskennallisesti, kuten ABB:n HPL245-550 katkaisijoille soveltuvasta kaavasta [ABB04]:

$$R = \frac{R_N}{2} \left(\frac{I_N}{I} \right)^{1,65}, \quad (8.1)$$

jossa R_N on korkein sallittu resistanssi käyttöön otossa, I_N katkaisijan nimellisvirta ja I virta, jolle suurin mahdollinen resistanssi lasketaan.

Käytännössä katkaisijoilla ei havaittu ylimenoresistanssin kehitymisessä vastaavanlaista trendiä kuin erottimilla. Ylimenovastukset olivat alle valmistajien suosittelemien maksimiarvojen. Koko populaatiota tarkasteltaessa saadaan esiin selvä nousutrendi. Nousu on kuitenkin harhaanjohtava, sillä vanhemmissa katkaisijoissa painottuvat vähäöljykatkaisijat, joissa on useampi katkaisupää sarjassa. Tällainen "trendi" kertoo enemmän eri-ikäisten katkaisijoiden rakenteellisista eroista, kuin resistanssin noususta iän myötä. Tyypikohtaisen tarkastelun perusteella voidaan sanoa, että koskettimet ovat varsin hyvässä kunnossa eikä kulumista juuri pääse tapahtumaan. Koskettimien on myös havaittu vähäöljykatkaisijoiden täyshuoltojen yhteydessä olevan silmänmääräisesti uuden veroisessa kunnossa [Laj07].

Kompensointikatkaisijoille tehdään myös dynaaminen resistanssimittaus (DRM), jossa saadaan resistanssi ajan funktiona kiinni- tai aukiohjauksessa. Jos DRM tehdään katkaisijan käyttöönoton yhteydessä, saadaan sormenjälkitunniste, jota voidaan käyttää myöhemmissä mittauksissa referenssinä. Toisin kuin staattisella mittauksella DRM:n avulla voidaan arvioida esimerkiksi valokaarikoskettimien kuntoa.

8.4.4 Kaasunpitoisuusmittaukset

SF₆-katkaisijoille tehdään mittaushuoltojen yhteydessä kaasuanalyysi, joissa mitataan kaasun kosteus- ja SF₆-pitoisuudet. Kaasun kosteus heikentää väliaineen dielektrisiä ominaisuuksia ja aiheuttaa korroosiota. Arvot on ilmoitettu miljoonasosina (ppm, parts per million) massan tai tilavuuden suhteen. Katkaisupäässä on selvä ylipaine ympäristöön nähden, joten kosteus ei tunkeudu helposti väliaineeseen. Mikäli katkaisijassa kuitenkin esiintyy vuotoja, on mahdollista, että kosteutta pääsee katkaisupäähän samaa reittiä ylipaineesta huolimatta. Kosteutta saattaa myös erottua kaasuun katkaisupään sisällä olevista muoviosista [Lai07, Laj07, Leh07, Pen07].

Mittaustuloksiin liittyy tällä hetkellä epävarmuutta, sillä tuloksia on annettu sekä tilavuuden että massan suhteen sekaisin. Arvoissa on jonkin verran skaalaeroa, mutta ei riittävästi, että ne voitaisiin erotella varmuudella ilman lisäselvitystä. Lisäksi tallennettuja mittauksia näyttäisi olevan liian vähän suhteessa tehtyihin mittaushuoltoihin. Sekaannusten takia asiaa tiedusteltiin myös suoraan palvelutoimittajilta, joiden mukaan raja-arvot ovat ylittyneet verrattain harvoin, arvion mukaan noin 3-10 % kaasuanalyyseistä [Laj07, Leh,07, Pen07]. Laitevikailmoituksia kosteusvioista ei löytynyt.

Kaasuanalyysissä mitataan myös kaasun SF₆-pitoisuus prosentteina. Sellaisilla alueilla, joilla lämpötila laskee huomattavan alas, voidaan käyttää rikkiheksafluoridin ja typen seosta, jolla on parempi pakkaskesto. Alla olevaan taulukkoon 8-4 on merkitty vain ne katkaisijat, joihin ei ole lisätty tyyppiä. Seoskaasujen sekoitussuhteita ei nimittäin saada kovinkaan helposti esille. Suurehkoja vuotoja ei ole havaittu mittaushuolloissa. Yleensä kaasunpaineen alenema havaitaan hälytyksellä.

Taulukko 8-4. Kaasukatkaisijoiden SF₆-pitoisuusmittaukset

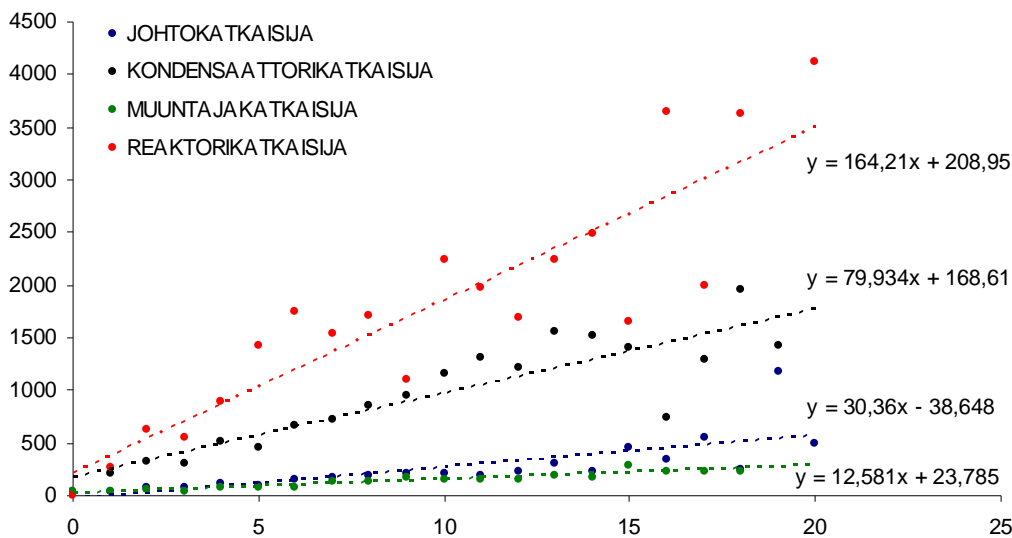
Lajimerkintä	Keskiarvo [%]	Keskihajonta [%]	Mittausten määrä [kpl]
8DN8	100,0	-	1
ELKSL31211	100,0	0,05	6
ELKSL3-2	100,0	-	1
FA1	99,5	0,3	8
GL211	99,6	0,3	5
HGF111/1C	98,6	1,2	35
HGF116/2B	98,4	1,1	4
HPL123/25A1	99,5	0,1	2
HPL145/2501	99,4	-	1
LTB145D1/B	99,8	0,2	8
S1-145F1/3131	98,8	-	1

8.4.5 Katkaisijoiden toimintakerrat

Katkaisijoiden toimintakertoja on kirjattu ylös mittauksina Elnetiin. Kuvassa 8-7 on esitetty eri rooleissa olevien kaasukatkaisijoiden keskimääräistä toimintakertojen kehitystä iän suhteen. Kat-

kaisijalajilla ei periaatteessa ole merkitystä toimintakertojen suhteen, mutta kaasukatkaisijat ovat uudempia ja oletettavasti laskurilukemat luotettavampia kuin vähäöljykatkaisijoilla. Vähäöljykatkaisijoita on ennen huollettu hyvin tiheästi, minkä seurauksena niille on kertynyt toimintakertoja selvästi enemmän. Absoluuttiset lukemat eivät siis ole vertailukelpoisia.

Valtaosa aukaisuista on mekaanisia, mutta kompensointikatkaisijoilla reaktiivisen virran katkaisu rasittaa katkaisijaa enemmän. Vikavirtojen katkaisuja ei tavallisesti ole kovin montaa vuodessa. Johto- ja muuntajakatkaisijoille toimintakertoja kertyy lähinnä normaaleista kytkentätoimenpiteistä, relekoestuksista ja muutamia huolloista.



Kuva 8-7. Kaasukatkaisijoiden toimintakertalaskurien lukemat.

Keskimääräiset vuosittaiset toimintakerrat voidaan lukea trendisuorien kulmakertoimista, joiden yksikkö on siis [krt/a]. Muuntajakatkaisijoille näyttäisi tulevan keskimäärin noin kymmenkunta ja johtokatkaisijoille 30 toimintakertaa vuodessa. Kondensaattorikatkaisijoilla vastaava lukema on keskimäärin 80 ja reaktorikatkaisijoilla reilu 160 toimintakertaa vuodessa. Toimintakertamäärät ovat tietysti hyvin sijaintiriippuvaisia ja edellä esitetyt luvut vain suuntaa-antavia. Reaktorikatkaisijat saattavat operoida jopa päivittäin.

8.5 Valmistajien suosittelemat huoltovälit

Valmistajat ovat olleet lähes yksimielisiä siitä, että erottimia tulisi puhdistaa ja rasvata noin viiden vuoden välein. Mikäli erottimia ei päästä huoltamaan näin usein tai jos niille ei tule riittävästi toimintakertoja, niitä pitäisi liikutella. Liikuttelu poistaa koskettimista lian ja karstan sekä ehkäisee vivuston jämähtämistä paikoilleen.

Katkaisijoiden kohdalla erityisen kiinnostuksen kohteena ovat kaasukatkaisijoiden suositellut huoltovälit. Vähäöljykatkaisijoiden huollon tarve on selvästi suurempi. Valmistajat ovat aikoinaan suositelleet eri laajuisia huoltotoimenpiteitä jopa vuositasolla ja täyshuoltoja noin 8-10 vuoden välein. Kokemuksesta kuitenkin tiedetään, ettei vähäöljykatkaisijoita pääsääntöisesti tarvitse huoltaa aivan näin usein, vaikka niiden huollon tarve onkin suurempi kuin SF₆-katkaisijoilla.

Taulukossa 8-5 on esitetty suhteellisen uusien kaasukatkaisijoiden huoltotoimenpiteiden ajoittamista. Suositeltujen huoltojen laajuudet eivät ole aivan suoraan vertailtavissa keskenään, mutta aikavälejä ja toimintakertarajoja voi kyllä pitää suuntaa-antavina.

Taulukko 8-5. Valmistajien suosittelemat huoltovälit SF₆-katkaisijoille.

Laji	Mittaushuolto		Laajempi huolto		Valmistaja
	Aika	Toimintakerrat	Aika	Toimintakerrat	
HPL245-550	3-6	2000	15	5000	ABB
HPL245 B1	6-8	2000	12-16		ABB
LTB	15	5000	30	10000	ABB
3AP2FI ja 3AP1FG	12	3000	25	6000	SIEMENS
S1-123	12			2000	ALSTOM

HPL-katkaisijat ovat selvästi joukon vanhimpia. Uudemmille katkaisijoille on määritelty selvästi pidemmät huoltovälit. Tämä ei välttämättä perustu uudempien katkaisijoiden parempaan suunnitteluun vaan hankittuun kokemukseen kaasukatkaisijoiden korkeasta luotettavuudesta ja vähäisestä huollon tarpeesta. LTB-tyyppisillä katkaisijoilla 30 vuoden tai 10 000 toimintakerran kohdalla puhutaan avaavasta täyshuollosta. Merkittävää on se, että suositellut huoltovälit ovat selvästi pidempiä kuin mitä Fingridin kaasukatkaisijoille käytetään.

Vastoin kuin kompensointikatkaisijoilla, toimintakerrat eivät keskimäärin edes tule täyteen johtaja muuntajakatkaisijoiden koko eliniän aikana. Ikä ja toimintakertaperustaisen huoltokynnyksen välinen vastaavuus on siis heikko. Taulukossa 8-6 on havainnollistettu toimintakertaperustaisen huoltovälin keskimääräistä pituutta vuosissa eri roolissa oleville katkaisijoille.

Taulukko 8-6. Keskimääräinen aika, että 2000 toimintakertaa tulee täyteen.

ROOLI	TOIMINTAKERRAT VUODESSA [krt/a]	AIKA, 2000 KRT TÄYNNÄ [a]
REAKTORIKATKAISIJAT	160	12,5
KONDENSAATTORIKATKAISIJAT	80	25
JOHTO- JA MUUNTAJAKATKAISIJAT	10-40	50-200

Toimintakerroilla tarkoitetaan puhtaasti mekaanisia AUKI-KIINNI ohjauksia, joissa virrat ovat alle katkaisijan nimellisvirran. Vikavirtakatkaisujen sallittua määrää voidaan puolestaan arvioida oikosulkuvirtojen "neliösummalla" [ABB04]:

$$\sum I_n^x = 20000[kA]^2 \quad (8.2)$$

Neliösumma ei itse asiassa ole täysin tarkka ilmaisu, koska eksponentti x vaihtelee eri katkaisijoilla lukujen 1,8 ja 2,0 välillä. Eksponentin suuruus määräytyy jännitetason ja katkaisupäiden lukumäärän mukaan. Kun "neliösumma" on täynnä, katkaisupäät pitäisi avata ja koskettimien kunto tarkistaa. Nykyisin oikosulkuvirtoja ei käytetä katkaisupäiden kunnossapidon ajoittamisessa, koska vikavirrat eivät tallennu mihinkään kunnossapidon sovellukseen, vaan ne tallentuvat muualle Elnetiin. Kyseisen peukalosäännön ja katkaisupäiden kunnan välisestä yhteydestä ei ole riittävästi kokemusta. Lisäksi oikosulkuneliösumma tulee täyteen vain hyvin poikkeuksellisissa tilanteissa, joten vikavirtojen järjestelmällinen seuraaminen ei ole kannattavaa kunnossapidon kannalta.

9 Kytkinlaitteiden elinkaari- ja kunnossapitokustannukset

9.1 Perusparannusten ajoittaminen

Perusparannuksiksi kutsutaan investointeja, joilla korvataan vanhentunutta laitekantaa. Myös tason nostoa voidaan nimittää perusparannukseksi. Perusteluina laitteiden uusimisille voivat olla esimerkiksi:

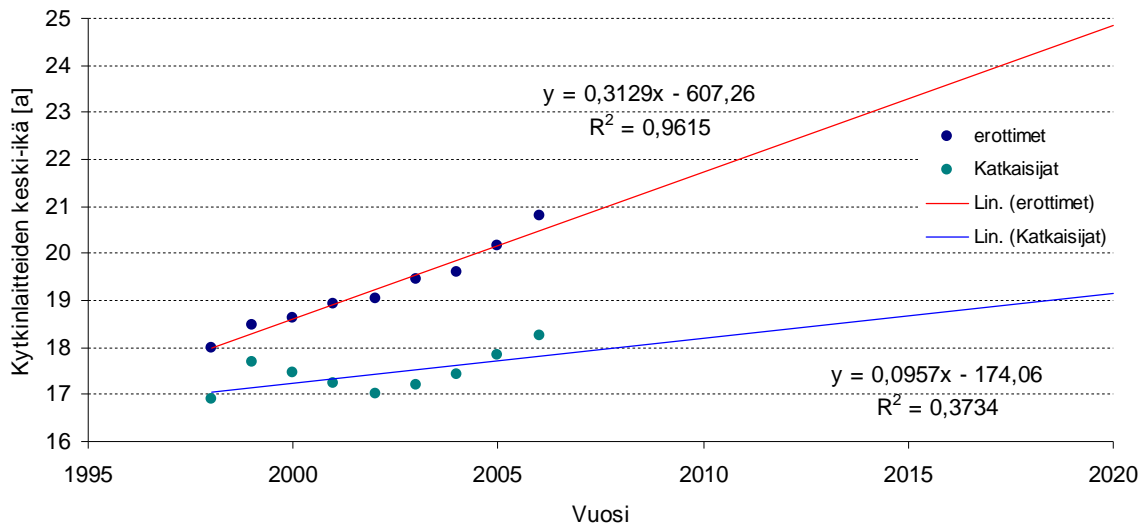
- Liian korkea vikataajuus
- Uusi teknologia ja sen tuomat merkittävät hyödyt
- Teknisen eliniän kulumisen umpeen
- Hankeniputus

Korkea vikataajuus voi olla ongelma esimerkiksi, jos kyseiselle asemalle tai kentälle on vaikea saada keskeytyksiä. Korkea vikataajuus nostaa tietenkin myös kunnossapitokustannuksia. Jos sähköasema on kriittinen verkon kannalta, kohonnut vikataajuus saattaa johtaa laitteiden vaihtoon, vaikka taloudellisia perusteluita vaihdolle ei olisikaan. Uuden teknologian parempi luotettavuus tai muut toivotut ominaisuudet voivat myös olla perusteluina korvausinvestoinneille. Hankeniputuksella tarkoitetaan useampien investointiprojektien yhdistämistä, millä pyritään saavuttamaan kustannussäästöjä. Hankeniputuksen vaikutus investoinnin ajoitukseen lasketaan kuitenkin enintään muutamissa vuosissa.

Kuvassa 9-1 on esitetty kytkinlaitteiden keski-ikien kehittyminen aikavälillä 1998–2006. Laittekanan keski-ikä on laskettu laitteiden ikäjakaumasta ja romutettujen laitteiden tiedoista eikä niitä ole painotettu jälleenhankinta-arvolla. Fingridin toiminta-aikana:

- Erottimien ikääntymisnopeus on ollut keskimäärin 0,31
- ja katkaisijoiden noin 0,096 vuotta vuodessa.

9.1.1 Ikäperustaiset korvausinvestoinnit



Kuva 9-1. Kytkinlaitteiden ikääntyminen Suomen kantaverkossa.

Vuosina 1999–2002 uusittiin huomattava määrä vanhoja vähäjytkatkaisijoita kaasukatkaisijoihin, mikä näkyy selvästi keski-ian kääntymisenä laskuun. Vuoden 2002 jälkeen kytkinlaitteiden ikääntymisnopeus on ollut suunnilleen 0,5 vuotta vuodessa. Tulevaisuudessa verkkoa on uusittava ja näiden korvausinvestointien myötä laitekannan keskimääräinen ikääntyminen hidastuu ja kääntyy mahdollisesti laskuun. Kuvaaja osoittaa, että laitekannan ikääntyminen Suomen kantaverkossa on ollut verrattain hidasta ja hyvin hallittua.

Puhtaasti ikäperustainen korvausmalli tarkoittaisi nykyisellään sitä, että kytkinlaitteet vaihdettaisiin 40 vuoden ikäisinä kunnosta riippumatta. Tämä johtaisi väistämättä siihen, että käyttökelpoista teknistä elinaikaa heitettäisiin hukkaan. Joissakin sähköverkkoyhtiöissä noudatetaan kunnonhallintapolitiikkaa, jossa ei tehdä lainkaan ennakoivaa huoltoa, mutta laitteet uusitaan "ajoissa". Seuraavassa kappaleessa tullaan osoittamaan, ettei tällainen toiminta ole taloudellisesti mielekäästä.

9.2 Kytkinlaitteiden elinkaarikustannukset

Kytkinlaitteiden elinkaarikustannukset voidaan laskea yksinkertaisesti summaamalla koko pitoajan aikaiset kustannukset yhteen. Kytkinlaitteiden tekninen pitoaika on kantaverkossa 40 vuotta. Elinkaarikustannukset sisältävät seuraavat komponentit [Hav06]:

$$C_{tot} = C_{investointi} + C_{huolto} + C_{vikakorjaus} + C_{häiriö} + C_{romutus} \quad (9.1)$$

Investointikustannukset pitävät sisällään suunnittelun, hankinnan ja asennuksen. Fingrid hankkii investointinsa avaimet käteen -periaatteella, minkä takia investointikustannuksia ei voida eritellä. Toimittaja sisällyttää kustannuksiin luonnollisesti myös oman katteensa. Investointikustannuksena on sujuvinta käyttää kytkinlaitteiden jälleenhankinta-arvoja (JHA). JHA:t perustuvat Fingridin Energiamarckinavirastolle ilmoittamiin lukuihin, jotka edustavat komponenttien keskimääräistä hintatasoa.

Huoltokustannuksiksi on tässä ajateltu ennakoivan huollon aiheuttamia kustannuksia laitteen pitoaikana. Vikakorjauskustannukset on taas laskettu kertomalla Major-vikataajuus vikakorjausten keskimääräisillä kustannuksilla ja pitoajalla, eli on laskettu vikaantumisriski elinkaaren ajalta.

Häiriötodennäköisyydet ja TJSA perustuvat häiriö-sovellukseen tallennettuihin tietoihin. 400 kV ja 220 kV erottimet eivät ole koskaan aiheuttaneet häiriötä, joten vuosittaista häiriötodennäköisyyttä on tämän pohjalta vaikea arvioida. 220 kV tai 400 kV katkaisijat eivät taas koskaan ole aiheuttaneet sellaista häiriötä, josta olisi kirjattu toimittamatta jäänyttä sähköä. Päävoimansiirtoverkkoa käyte-tään renkaassa, joten tämä on ymmärrettävää. Yhden häiriön keskimääräinen TJSA on laskettu suoraviivaisesti summaamalla yhteen TJSA:t ja jakamalla kunkin jänniteportaan häiriöiden määräl-lä. Häiriöriski on siis TJSA:n odotusarvo historiallisilla tiedoilla laskettuna.

Kytkinlaitteiden romutusten kustannusvaikutukset voidaan jättää huomiotta. Romuttamisen työkus-tannukset ja materiaalihyvitykset vaihtelevat jonkin verran, mutta yleensä kustannusvaikutus on lähellä nollaa. Elinkaarikustannuksia on arvioitu taulukossa 9-1.

Taulukko 9-1. Kytkinlaitteiden elinkaarikustannukset 2007 hintatasolla.

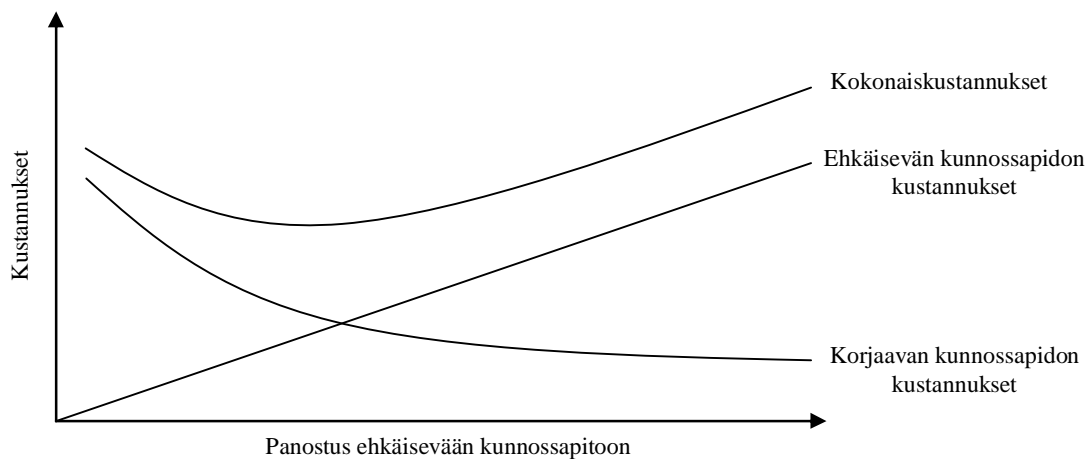
Erottimet	JHA $C_{investointi}$	Ennakoiva huolto C_{huolto}	Vikakorjaus C_{vika}	P(Laite aiheuttaa häiriön) [%]	TJSA	Häiriöriski $P \times TJSA$	Elinkaari- kustannuk- set C_{tot}	$C_{investointi}$ / C_{tot}
400 kV	66 000 €	4 825 €	360 €	-	-	-	69 935 €	93 %
220 kV	49 000 €	4 110 €	280 €	-	-	-	52 140 €	92 %
110 kV	24 000 €	3 295 €	760 €	0,00019	55 000 €	407 €	27 212 €	84 %
SF ₆ - Katkaisi- jat								
400 kV	144 000 €	5 965 €	360 €	0,0018	-	-	149 075 €	96 %
220 kV	109 000 €	5 250 €	720 €	0,0047	-	-	113 720 €	95 %
110 kV	46 000 €	3 890 €	280 €	0,0033	36 000 €	4 752 €	53 672 €	84 %

Oleellista on huomata, että käytönaikaiset kustannukset ovat erittäin matalia verrattuna investointi-kustannuksiin (viimeinen sarake). Puhtaasti taloudellisesta näkökulmasta populaation vikataajuus ei käytännössä voi kasvaa niin suureksi, että sillä voitaisiin perustella ennenaikaiset korvausinvest-

toinnit. Laitetta kannattaa korjata niin kauan, kunnes sen tekninen elinkaari on käytetty, tai se on vakavan vikaantumisen seurauksena korjauskelvoton.

Jos voitaisiin osoittaa, että häiriötaajuus nousee selvästi vikataajuuden mukana, laitteenvaihdot tulisivat nopeasti kannattaviksi vikataajuuden noustessa. Kaikki merkit viittaavat siihen, että Major-vikataajuus ja käyttöhäiriöt eivät korreloi erottimilla. Katkaisijoilla yhteys on selvempi, mutta häiriöissä menetetään yllättävän harvoin siirtoa, eli suorat kustannusvaikutukset eivät ole kovin suuret. Kuitenkin Major-viat vähentävät aina vähintään redundanssia, mikä ei näy suorana kustannusvaikutuksena. Käyttövarmuus siis alenee vian keston ajan. Major-vikojen on havaittu olevan keskimäärin hyvin satunnaisia läpi katkaisijan elinkaaren, joten laiteryhmätasolla se ei vaikuta perusparannusten ajoittamiseen. Tyypitasolla saattaa tietysti esiintyä poikkeuksia.

9.3 Huoltovälin vaikutus kunnossapidon kustannuksiin



Kuva 9-2. Kunnossapidon kokonaiskustannusten ja luotettavuuden optimoinnin periaatekuva.

Kuvassa 9-2 on esitetty periaatekuva ennakoivan kunnossapidon lisäämisen vaikutuksista kokonaiskustannuksiin. Olennaista on ymmärtää, että vaikka ennakoivan huollon määrää lisättäisiin optimaalisen pisteen yli, sillä ei saavuteta enää samaa marginaalista hyötyä, eli säästöä korjaavan kunnossapidon kustannuksista. Todennäköisempää on itse asiassa se, että tietyn pisteen jälkeen huoltovälin tihentäminen nostaa korjaavan kunnossapidon kustannuksia huoltojen itsensä aiheuttamien vikojen takia. Teknillistaloudellisesti on järkevää toimia optimipisteessä, eli kokonaiskustannusten minimissä, jolloin ennakoivasta kunnossapidosta saadaan marginaalisesti suurin hyöty.

Optimaalisen toimintapisteen löytämiselle ei ole yksinkertaista menetelmää. Oikeastaan ainoa tapa on huoltovälin muuttaminen perustuen parhaaseen mahdolliseen arvioon ja vaikutusten seuraaminen.

Taulukko 9-2. Kytkinlaitteiden kunnossapitokustannukset vuodelta 2006.

Kustannuslaji	Katkaisijat	Erottimet
Peruskunnossapito	77 546 €	131 603 €
Lisätyöt	34 248 €	27 884 €
Viankorjaukset	88 792 €	52 327 €
Erikoiskunnossapito	89 126 €	3 730 €
Suuret kunnossapitohankkeet	238 302 €	116 506 €
Kunnossapito yhteensä	528 015 €	332 050 €

Taulukossa 9-2 on esitetty kytkinlaitteiden kunnossapidon kustannukset vuodelta 2006. Peruskunnossapito käsittää erottimien ja katkaisijoiden yksikköhintaiset huollot. Yksikköhintaisen huollon laajuuden ulkopuoliset työt laskutetaan lisätöinä. Katkaisijoiden erikoiskunnossapito tarkoittaa lähinnä vähäöljykatkaisijoiden täyshuoltoja. Erottimien erikoiskunnossapidon kustannukset ovat mahdollisesti kirjausvirhe. Paineilmakatkaisijoiden täyshuollot voivat maksaa 60-70 k€, joten ne sisällytetään suuriin kunnossapitohankkeisiin. Erottimien suuret kunnossapitohankkeiden kustannukset käsittävät TPF-saksierottimien virtateiden täyshuolto- ja uusimisprojektin, jonka kokonaiskustannusten on arvioitu olevan noin 660 k€. Suurin osa kustannuksista jää vuodelle 2007.

Taulukossa 9-3 on esitetty kytkinlaitteiden peruskunnossapidon laskennalliset kustannukset. Peruskunnossapidon kustannukset on laskettu käyttämällä toimittajien yksikkökustannuksia ja huomioimalla eri laitteiden poikkeavat huoltovälit. Keskimääräisinä sivukuluina on käytetty 250 €/per huolto. Täyshuoltojen laitekohtaiset kustannukset on arvioitu toteutumista.

Taulukko 9-3. Kytkinlaitteiden peruskunnossapidon laskennalliset vuosikustannukset nykyisellä kunnossapitopolitiikalla.

Alalaiteryhmä	Peruskunnossapito	Täyshuollot	Yhteensä	Kunnossapitokustannukset laitetta kohden [€/a]
Kaasukatkaisijat	71 140 €	0 €	71 140 €	110 €
Vähäöljykatkaisijat	36 900 €	38 140 €	75 040 €	216 €
Paineilmakatkaisijat	7 278 €	135 333 €	142 611 €	4 918 €
Yhteensä	115 317 €	173 473 €	288 790 €	
Kiertoerottimet	216 070 €			99 €
Tartuntaerottimet	100 586 €			111 €
Veitsierottimet	8 024 €			59 €
	324 680 €			

Taulukosta huomaa nopeasti, että paineilmakatkaisijoiden käyttökustannukset ovat kohtuuttoman suuria verrattuna muihin katkaisijatyyppeihin. Paineilmakatkaisijoiden vuosittaiset kunnossapitokustannukset ovat peräti 141 k€, vaikka laitteita on vain 29 kappaletta. Yhden 400 kV paineilmakatkaisijan täyshuolto voi kestää jopa kolme viikkoa, joten huollon kustannukset ovat reilusti yli

puolet katkaisijan jälleenhankinta-arvosta. Paineilmakatkaisijoiden etuna on se, että niiden katkaisukyky on erittäin korkea. Lisäksi ne kykenevät katkaisemaan myös tasavirtakomponentin ennen virran nollakohtaa, mikä ei onnistu toisilta katkaisijalajeilta. Tätä ominaisuutta tarvitaan isojen generaattoreiden lähellä olevilta katkaisijoilta.

10 Johtopäätökset ja parannusehdotukset

10.1 Erottimien kunnossapito

10.1.1 Erottimien huoltovälit

Vika- ja huoltodatan analyysien perusteella voidaan sanoa, että erottimien huoltovälejä voidaan pääsääntöisesti pidentää muutamilla vuosilla ilman mainittavia haittavaikutuksia. Kustannussäästöt itse huollossa eivät välttämättä ole suuria, mutta on otettava huomioon, että huoltojen määrän pudottaminen vähentää myös käyttöhenkilökunnan työkuormitusta. Näin saavutettavia euromääräisiä säästöjä on kuitenkin vaikeampi arvioida suoraan.

Huoltovälin pidentämistä voidaan perustella seuraavilla argumenteilla:

- Vikataajuus on suurimmalla osalla erottimista vakio huoltovälillä, eli vikaantuminen on satunnaista (kuva 7-15)
- Vikataajuus näyttäisi pysyttelevän ainakin ensimmäisten 20 vuoden aikana suhteellisen vakiona (kuva 7-9)
- Major-viat ovat luonteeltaan tyyppikohtaisia tai satunnaisia, jolloin kunnossapidon mahdollisuus vaikuttaa näihin on rajoitettu (kuva 7-10)
- Palvelutoimittajien huoltohenkilöstön arvioiden mukaan 92 % erottimista on hyvässä tai erinomaisessa kunnossa ennen huoltoa (taulukko 8-2 ja 8-3)
- Ylimenoresistanssien nousu ja huollosta saatu hyöty ovat keskimäärin olleet vähäisiä elinkaaren alkuosalla (kuva 8-2, liite 5)
- Vain vajaassa kymmenessä prosentissa huolloista on tehty vikailmoituksia (taulukko 7-6)
 - Major-vikojen osuus on vain 0,3 % huoltojen määrään suhteutettuna
- Yksi erotin aiheuttaa häiriön keskimäärin kerran 5462 vuodessa (kappale 7.10.1)

Huollettavien erottimien joukossa on aina niitäkin laitteita, jotka todella ovat huollon tarpeessa. On kuitenkin kyseenalaista kannattaako koko laitemassaa huoltaa, jotta yksittäistapaukset saadaan kiinni. Erottimien huollon tarpeessa on selkeästi nähtävissä eroja tyyppien välillä, mikä kannattaa ottaa huomioon huoltoväliä päätettäessä. Erot näkyvät esimerkiksi vikataajuudessa ja ylimenoresistanssimittauksissa. Erottimien kunnossapidossa on mahdollista siirtyä aikaperustaisesta huollosta enemmän kuntoperustaisempaan. Kunnossapidon määrittelyä varten erottimista laaditaan vikakor-
tit, joihin on laskettu oleelliset tunnusluvut ja esitetty ylimenoresistanssin kehitys.

Mikäli jännitehuollot hinnoitellaan tulevilla kausilla edullisemmin, voitaisiin perinteisistä huolloista luopua peräti kokonaan 110 kV verkossa. Liikuttelu ja rasvaus pitänevät erottimet keskimäärin hyvässä kunnossa. Ohjauspiirin sähköiset viat ovat joka tapauksessa sellaisia, joihin ei kunnossapidolla voida juuri vaikuttaa ennaltaehkäisevästi.

Jos muut kuin neljän ja kuuden vuoden huoltovälillä olevat erottimet siirrettäisiin kymmenen vuoden huoltovälille, saavutettaisiin arviolta 30 k€ vuotuiset säästöt ennakoivassa kunnossapidossa nykyisellä hintatasolla.

10.1.2 Voitelurasvat

Erottimien koskettimien ja vivuston kuivuminen, voitelurasvan kovettuminen ja epäpuhtauksien kerääntyminen liikkuville kontaktipinnoille voi aiheuttaa erottimen jäykistymistä. Joissakin harvoissa tapauksissa jopa niin paljon, että erotin ei enää ole ohjattavissa. Säännöllinen liikuttelu tai huolto auttaa pitämään erottimen herkkänä.

Ongelmaan saattaa olla kuitenkin ratkaisu, joka ei vaadi aktiivista toimintaa. Fingridissä käytetään pääsääntöisesti suhteellisen edullisia Mobil-merkkisiä voitelurasvoja. Markkinoilla on kuitenkin tarjolla huomattavasti arvokkaampia rasvoja ja öljyjä, joita jotkin valmistajat ovat suositelleet käytettäväksi. Perusteellista selvitystä voitelurasvojen eroista ei ole Fingridissä toteutettu. Käyttökokemuksia voidaan selvittää esimerkiksi muilta kantaverkonhaltijoilta, tai sitten toteuttaa oma pienimuotoinen T&K-hanke jollain sopivalla asemalla. Jälkimmäisessä vaihtoehdossa tuloksia jouduttaisiin odottamaan vähintään kahdeksan vuotta, mikä tekee kokeilusta vähemmän houkuttelevaa.

10.1.3 Lämpökuvaus

Asemat lämpökuvataan nykyisin kerran vuodessa. Lämpökuvauksella voidaan havaita huonot liitokset ja erottimien virtateiden kohonneet ylimenoresistanssit. Kuvauksia ei kuitenkaan ole tähän mennessä ajoitettu kuormien mukaan, joten osa kuvauksista on väistämättä turhia. Lämpöteho on suoraan verrannollinen resistanssiin ja virran neliöön, joten kuormituksella on oleellinen merkitys havainnoinnin kannalta. Jaksolliset lämpökuvaukset on hyvä ajoittaa talveen, jolloin kuormitus on kova ja kohonneet resistanssit paremmin havaittavissa. Lumitilanne aiheuttaa tosin oman epävarmuustekijän. Lämpökuvausten laadun parantaminen on erottimien kunnonvalvonnan kannalta hyödyllistä varsinkin, jos huoltoväliä pidennetään tai aikaperustaisesta huoltamisesta luovutaan kokonaan. Kuvauksilla saadaan poimittua huollon tarpeessa olevat yksittäiset erottimet.

Erittäin tärkeille asemille voidaan harkita myös kiinteiden lämpökameroiden asentamista. Kameroiden hinta on joitakin kymmeniä tuhansia euroja, joten aivan pienestä summasta ei ole kyse

[Yli07]. Esimerkiksi ydinvoimalaitosten kytkinkentillä kamera saattaisi olla perusteltu. Periaatteessa yhdenkin vakavan vian havaitseminen ennen kuin se aiheuttaa häiriön riittäisi kattamaan kameran kustannukset. Kiinteän kameran etuna on erityisesti se, että tehotilanne on kuvattaessa tiedossa eikä ajoittamiseen liity edellä kuvattuja ongelmia.

Nykyisin lämpökuvaukset kilpailutetaan erillään peruskunnossapidosta. Eräs vaihtoehto voisi olla myös se, että palvelutoimittajilta tiedustellaan lämpökuvauksvalmiutta ja harkitaan sen sisällyttämistä peruskunnossapitoon [Hyn07]. Mikäli palvelutoimittajilla on käytössään lämpökamerat saataisiin kuvauksiin lisää joustoa ja tarvittaessa nopeallakin vasteajalla. Lämpökameran korkea hinta saattaa olla esteenä halukkuudelle tuottaa kyseistä palvelua.

10.1.4 Saksierottimet

Kuten kappaleessa 8.3.2 todettiin, TPF-erottimien virtatiet olivat huolloista huolimatta päässeet niin huonoon kuntoon, että niille piti suorittaa erikseen täyshuolto- ja modifiointiprojekti. Työssä kiinnitettiin tästä syystä huomiota myös GSSB-pantografierottimien ylimenoresistanssin mittauksiin ja havaittiin, että trendi on huolestuttavan samanlainen kuin TPF-tyyppisillä erottimilla (liite 5). GSSB-erottimet ovat huomattavasti TPF-erottimia nuorempia, joten tulos oli yllättävä. Sähköinen resistanssi ei välttämättä kerro suoraan virtateiden mekaanisesta kunnosta, mutta yllättävästä TPF-projektista viisastuneina ei mittauksia kannata jättää huomiotta. TPF-erottimet siirrettiin havaittujen vikojen vuoksi kuuden vuoden huoltovälille elinkaaren loppuosalla. Saattaa olla, että näin kannattaa tehdä myös muille saksierottimille, mutta asia vaatii lisäselvitystä. Pantografierottimia käytetään yksinomaan kiskoerottimina. Ne ovat fyysisiltä dimensioiltaan hyvin pitkiä, joten pantografin kaatumisen voi pahimmillaan aiheuttaa kokoojakiskon oikosulun. Ruotsissa vuonna 2003 TPF-tyyppinen erotin kaatui aiheuttaen oikosulun kahden pääkiskon välille, minkä seurauksena puolet valtakunnasta pimeni.

Pantografeissa ylimenoresistanssi jää helposti virtateiden nivelien liukukosketinpesiin, jolloin suurempi osa kuormavirrasta alkaa kiertää "terveiden" virtateiden kautta. Virta saattaa myös oikaista sellaisen osan, kuten nivelpultin kautta [Hyn07], jota ei ole suunniteltu kestävään kuormitusvirtaa. Edelleen voi käydä niin, että lopulta on jäljellä enää yksi "terve" virtatie, jonka kautta pääosa virrasta kulkee. Tästä syystä kuumimpana lämpökuvauksessa näkyvä virtatien osa voi nimenomaan olla hyväkuntoisin [Lai07]. Kuumeneminen, kontaktipintojen palaminen ja rasvan karstoittuminen nostavat resistanssia entisestään, joten ilmiö on itseään kiihdyttävä. Tämän takia korkeisiin ylimenoresistansseihin on puututtava, vaikka ne eivät itsessään olisi vielä huolestuttavan korkeita [Cra07].

Pantografi-tyyppisiä erottimia ei välttämättä kannata enää asentaa uusille asemille, koska ne vaativat erityistä kunnossapitoa rakenteensa vuoksi ja niiden virtateiden kunnosta on vaikea tehdä päätelmiä mittauksilla tai lämpökuvauksilla. Lisäksi ne ovat mekaanisesti heikompia. Huonot käyttökokemukset Suomessa ja Ruotsissa on myös laskettava miinukseksi. Pantografien tilalla voidaan käyttää myös muita vertikaalisia erottimia, kuten suoravartisia tartuntaerottimia tai polvierottimia.

GSSB-tyypin saksierottimille kannattaa tehdä muutama pistokoe, joissa huollon yhteydessä virtateille suoritetaan diagnostinen täyshuolto. Näin voidaan saavuttaa varmuus siitä, onko kyse todella tyypin- vai alalaiteryhmäkohtaisesta ongelmasta.

10.1.5 Vianetsintätehtävät

Työn yhteydessä pohdittiin vianetsintätehtävien eli testauksen käyttöä erottimien kunnossapidossa. Tiedetään, että tietty osa erottimista on jatkuvasti vikatilassa, eli ne eivät ole todellisuudessa käytettävissä. Käytännössä vianetsintä tarkoittaa sitä, että laitteelle tehdään koekytkentöjä vianetsintäohjelman mukaan ja havaitut viat korjataan hallitusti. Vianetsintätehtäviä voidaan perustella seuraavilla argumenteilla:

- Testauksella voidaan havaita laitteiden piilevät viat kuten
 - Ohjainpiirin sähköiset viat
 - Virtateiden kohdistusviat
- Laitteiden käyttämättömyydellä on taipumusta aiheuttaa vikoja.
- Ylimenoresistanssi pysyy erottimilla alhaisempana, koska liikuttelu poistaa kertynyttä likaa ja karstaa sekä estää rasvaa kovettumasta.
- Voidaan parantaa laitteiden keskimääräistä käytettävyyttä, joka on tarpeen erityisesti sellaisissa kytkennöissä, joissa ei ole henkilökuntaa paikalla (kamerakytkennät, häiriöiden palautuskytkennät)

Näennäisestä yksinkertaisuudestaan huolimatta vianetsintätehtävillä on kolme erityisen huonoa puolta:

- Vianetsintätehtävät kuormittavat kytkennöistä vastaavaa verkkokeskusta ja mahdollisesti myös muita sidosryhmiä.
- Ne ovat mahdollisia vain tietyillä kytkinlaitosrakenteilla ja käyttötilanteen salliessa ja
- Ne nostavat häiriöriskiä

Erityisesti kolmas kohta on ongelmallinen. Jokainen kytkentä on periaatteessa riski, koska tiedetään, että laitteilla on jokin nollaa suurempi vikataajuus ja on olemassa inhimillisten virhekytkentöjen mahdollisuus. Näin ollen ylimääräiset kytkennät lisäävät häiriöiden todennäköisyyttä. Kun kan-

taverkkoyhtiön tehtävissä käyttövarmuus on tärkein toiminnan lähtökohta, vianetsintätehtäviä on vaikea perustella, jos sillä itse asiassa heikennetään käyttövarmuutta. Lisäksi on aina mahdollista, että piilevä vika ehditään havaita seuraavassa huollossa ennen kuin erottimelle tulee käyttötarvetta. Osalle erottimista tulee riittävästi käyttötoimenpiteitä muutenkin.

Vianetsintätehtäviä ei voida edellä esitettyjen syiden takia suositella erilliseksi kunnossapitotehtäväksi. Muissa kytkennöissä, kuten relekoestuksissa, erottimien toimintaa voitaisiin kuitenkin seurata tarkemmin.

10.1.6 Jännitehuolto

Erottimille piti alun perin RCM-työryhmän selvitysten mukaisesti toteuttaa vuoron perään huolto ja jännitehuolto. Palvelutoimittajat kuitenkin hinnoittelivat jännitehuollon hinnan niin korkeaksi, että niistä luovuttiin. Jännitehuolloissa oli ongelmana myös se, että usein asemalle mentäessä havaittiinkin koko kentän olevan täysin jännitteettömänä, jolloin erottimille voitiin suorittaa normaalin laajuinen huolto [Hyn07]. Tämä taas sekoitti helposti huoltojen välisen vuorottelun. Jännitehuollon pitää olla selvästi tavallista huoltoa edullisempi, jotta sen suorittaminen on järkevää.

10.2 Katkaisijoiden kunnossapito

Vähäöljykatkaisijoiden kunnossapitoon ei edellä esitettyjen analyysien valossa esitetä mitään suuria muutoksia. Nykyiset vähäöljykatkaisijat ovat elinkaaren loppupuolella, ja jäljellä olevalla osalla kannattaa noudattaa olemassa olevaa kunnossapito-ohjelmaa. Vähäöljykatkaisijoilla on selvästi korkeampi huollon tarve ja vikataajuuden on havaittu kasvavan. Ainoa havaittu puute nykyisessä kunnossapidossa on katkaisupään öljyn suodattaminen. On teknisesti mielekkäämpää ja kustannustehokkaampaa vaihtaa öljy kokonaan uuteen täyshuoltojen yhteydessä.

Kaasukatkaisijoilla tilanne on kuitenkin erilainen. Huoltovälin pidentämistä puoltavat seuraavat seikat:

- Vikataajuus huoltovälillä on vakio (kuva 7-16)
- Vikataajuus ensimmäisten 23 vuoden aikana on miltei vakio (kuva 7-12)
- Kaasukatkaisijoiden toiminta-arvot ovat käytännössä aina sallituissa rajoissa (kuvat 8-1, 8-2 ja liite 6)
- Koskettimien ylimenoresistanssin kehityksessä ei ole nousevaa trendiä (kappale 8.4.3)
- Valmistajat suosittelevat uusille kaasukatkaisijoille selkeästi pidempiä huoltovälejä (kappale 8.5)

- Toimintakertamäärät tulevat täyteen vain joillakin kompensointikatkaisijoilla (kappale 8.4.5)
- Huolloissa havaittujen vikojen suhde huoltojen määrään on vain 10 % (taulukko 7-7)
 - Major-vikojen osuus huolloista on vain 0,3 %
- Kaasun painetta voidaan valvoa jatkuvatoimisesti yleistyvillä tiheysvahdeilla

Mikäli kaikkien kaasukatkaisijoiden mittaushuoltojen väli pidennetään esimerkiksi kahteentoista vuoteen, kaasu kannattaa kuivattaa aina analyysin yhteydessä, vaikka kosteus olisikin sallitun rajan alapuolella [Lai07]. Tämä tietysti olettaen, että kuivatus ei tule kohtuuttoman kalliiksi. Mittaus- huoltojen harventaminen 12 vuoteen pudottaisi kaasukatkaisijoiden kunnossapitokustannuksia keskimäärin noin 30 k€ vuodessa nykyisellä hintatasolla. Kaasun kosteuspitoisuuden kasvua on kuitenkin arvioitava vielä tarkemmin mittauksiin liittyvän epävarmuuden takia.

10.3 Vika- ja kunnossapitotiedot

10.3.1 Elnetin laitevikailmoitus

Kävin läpi manuaalisesti noin 3800 laitevikailmoitusta. Tarkistusten lisäksi pyrin täyttämään oleelliset tyhjäksi jääneet kohdat ja saattamaan eriaikoina tehdyt kirjaukset mahdollisimman yhdenmukaisiksi. Lisäsin ultraäänimittauksen havaintotavaksi ja kirjoitin vikamuotokentät uusiksi.

Laitevian asteissa oli aiemmin sellainen käytäntö, että hyvin lievien vikojen kohdalla tai vioissa, joissa laite ei ollut aiheuttajana, laitevian asteen kenttä jätettiin tyhjäksi. Tällöin oli vaikea sanoa, oliko kenttä jäänyt tyhjäksi tarkoituksella vai vahingossa. Selvyiden vuoksi lisäsin laitevian asteisiin vaihtoehdon "havainto".

Vikatietojen tarkistuksen yhteydessä havaitsin myös, että laitteiden vikaantuneiden osien jaottelu ei ole täysin yksiselitteistä. Vikatietojen RCM-analyysissä olisi tärkeää, että osajärjestelmillä olisi selvät rajat keskenään. Hyvä esimerkki epämääräisestä jaottelusta on esimerkiksi katkaisijan osa "voimansiirto/jouset". Järkevämpää olisi hajottaa osat selviksi kokonaisuuksiksi, kuten "mekaniikka", "jouset" ja "kytkentätanko". Puutteina mainittakoon, ettei esimerkiksi katkaisuväliaine tai hydraulikka ollut valittavissa vikaantumisen kohteeksi.

Yleisesti suosittelen, että vioittuneet osat kirjataan tarkalla tasolla. Analyysiä tekevä henkilö voi tällöin ryhmitellä vikoja haluamallaan tavalla ja valita korkeamman tarkastelutason. Tällöin varmistutaan siitä, ettei vikoja ainakaan kirjata sopivan kohteen puuttumisen takia väärille komponenteille.

Samoilla katkaisijoilla voi olla käytössä erilaisia ohjaintyyppisiä. Nykyisin Elnetistä ajettavaan laitevikaraporttiin ei kuitenkaan tulostu ohjaimen tyyppimerkintää tai alalaiteryhmää (moottorijoussi/hydraulinen). Ohjaimen tiedot kannattaa lisätä raporttiin.

Vikailmoituksessa on neljä kohtaa, jotka nykyisellään eivät ole luotettavia tai tarpeellisia. Nämä kohdat ovat "vian syy", "ympäristöolosuhteet", "vian vaikutus" ja "korjauksen kiireellisyys". Vian syy oli hankala arvioida, joten lista vaihtoehtoista muutettiin yksinkertaisemmaksi, sillä seurauksella, että kentän informaatioarvo on nyt vähäinen. Vian syy pitää sisällään tiedon onko kyseessä ikääntymisestä, kulumisesta, inhimillisestä virheestä jne. aiheutunut vika. Kyseinen kohta pitäisi siirtää vanhassa laajuudessaan Fingridin laiteasiantuntijoiden täytettäväksi "tarkastus"-välilehdelle, jolloin sen täyttö olisi kontrolloitua. "Ympäristöolosuhteet" on turha tieto; tarkastus tai huoltopäivän sää ei sisällä kunnossapidon kannalta mitään informaatiota. Asemien olosuhteiden analyysi on syytä tehdä jossain muussa yhteydessä kuin laitevikailmoituksissa. "Vian vaikutus" ja "korjauksen kiireellisyys" vaikuttavat ensi kuulemalta hyödyllisiltä tiedoilta. Palvelutoimittajalla on kuitenkin heikot mahdollisuudet täyttää näitä kenttiä. Muutenkin jako minor- ja Major-vikoihin pitää jo saman tiedon sisällään.

Tyyppivikojen hallinnoinnille ei nykyään ole yhtenäistä käytäntöä. Suosittelen, että epäiltyjä ja todettuja tyyppivikoja varten luodaan oma taulukkonsa. Näin varmistetaan, että tiedot ovat kaikkien käytettävissä ja vikoihin voidaan puuttua riittävän ajoissa.

Korvausinvestointien määrä tulee kantaverkossa lisääntymään huomattavasti seuraavan 20 vuoden aikana. Elnetistä ei kuitenkaan ole kovinkaan helppo saada selville korvattujen laitteiden määriä. Tällä hetkellä ne pitää hakea sillä oletuksella, että laite on romutettu välittömästi vaihdon jälkeen, mikä ei välttämättä pidä paikkaansa. Ongelma voitaisiin ohittaa lisäämällä laitehistoriaan tapahtuma, joka osoittaisi, että laite on korvattu. Tätä varten olisi syytä laatia joko erillinen "perusparannus" -raportti tai lisätä tiedot esimerkiksi "laiteluettelo" -raporttiin.

10.3.2 Huolloissa havaitut viat

Huolloissa kirjattujen laitevikojen pieneen määrään on kiinnitetty erityistä huomiota. Keskustelut palvelutoimittajien kanssa ovat antaneet ymmärtää, etteivät kaikki pienet puutteet tule aina kirjatuksi [Lai07, Yli07]. Laitevikojen tarkka kirjaus on tärkeää, jotta kunnossapitotoimenpiteen vaikutusta voidaan arvioida. Palvelutoimittajia kannattaa opastaa ja informoida vikatietojen täytössä säännöllisin väliajoin, jotta väärinkäsityksiltä vältyttäisiin. Fingridin perspektiivistä on hyvin vaikea tehdä mitään johtopäätöksiä palvelutoimittajan sisäisestä tiedonkulusta, mutta olisi tärkeää, että oikeat tiedot välittyvät huoltohenkilöstöltä sille henkilölle, joka syöttää tiedot Elnetiin.

10.3.3 Kunnonvalvontamittausten seuranta

Kunnonvalvontamittaukset tarjoavat hyvän analyttisen pohjan laitteiden kunnon seurantaan. Mittauksia tulisi tulevaisuudessa seurata ja käyttää aktiivisesti kunnonhallinnan apuna. Nykyisin niiden käyttö on rajoittunut yksittäisten laitteiden kunnonhallintaan. Joissain tapauksissa kunnonvalvontamittauksilla voi olla jonkin verran ennustavuutta tyyppitasolla. Jos mittauksia kuitenkin seurataan yksittäisinä, voivat tyyppille ominaiset trendit jäädä huomaamatta. Tällä hetkellä laitteiden mittaus-tietoja ei saada Elnetistä helposti analysoitavassa muodossa, vaan tietokantakyselyt on tehtävä itse. Seuraavissa Elnetin päivityksissä lisätään tietojärjestelmään mittauksista Excel-raportti, jolloin tiedot ovat helposti koko kunnossapito-organisaation käytettävissä.

Erottimien kuntoarviot koettiin hyvin informatiivisiksi. Niiden käyttöä voitaisiin harkita soveltuvin osin myös katkaisijoille ja muille primäärilaitteille.

Kunnonvalvontamittausten analyysissä havaittiin, että osa mittauksista on täytetty selvästi väärin tai ne ovat jääneet kokonaan kirjaamatta. On järjetöntä kerätä mittausdataa kymmenen vuoden ajalta vain havaitakseen, että kirjaustapa ei ole yhtenäinen sillä seurauksella, että tiedoilla ei enää tee mitään. Näin pääsi käymään kaasukatkaisijoiden kosteusmittauksissa, joissa on sekaisin ppm(v) ja ppm(m) annettuja yksiköitä. Myös toimintakertojen tallennuksissa on epäloogisuuksia. Kirjauksia ei ole aina tehty asianmukaisesti jokaisen huollon yhteydessä. Jatkossa mittaus-tulosten kirjaamista on valvottava tarkemmin ja mittaukset ohjeistettava nykyistä selvemmin.

11 Yhteenveto

Tässä työssä analysoitiin Suomen kantaverkon kytkinlaitteiden vika- ja kunnossapitotietoja, joita on tallennettu Elnet-verkkotietojärjestelmään yli kahden vuosikymmenen ajan. Työn tarkoituksena oli luoda pohja kytkinlaitteiden kunnonhallinnan uudelleenarviointiin ja tunnistaa mahdolliset kehityskohteet. Erityisinä kiinnostuksen kohteina olivat ennakoivan kunnossapidon ja ikääntymisen välinen yhteys sekä kunnonvalvontatoimenpiteiden tehokkuus.

Erottimien ja vähäöljykatkaisijoiden vikataajuuden havaittiin nousevan elinkaaren loppupuolella kiihtyvästi. Kaasukatkaisijoilla vikaantumiset näyttävät olevan suhteellisen satunnaisia ensimmäisten 20 vuoden aikana. Yhteistä kaikille kytkinlaitteille on vakavien Major-vikojen esiintymisten satunnaisuus. Ikääntyminen ei siis teknisen pitoajan (40 vuotta) puitteissa lisää vakavien vikojen todennäköisyyttä merkittävästi. Ainoan havaitun poikkeuksen muodostavat tiettyjen erotintyyppien tukieristimet. Major-viat ovat luonteeltaan usein sellaisia, että ennakoivan huollon olisi vaikea tai mahdoton estää niitä.

Kunnonvalvontamittaukset ja huolloissa havaittujen vikojen vähäinen määrä viittaavat siihen, että laitekanta on pääsääntöisesti hyvässä kunnossa huoltovälin päässä. Myös laitevalmistajat suosittelevat nykyistä selvästi pidempiä huoltovälejä uudemmille kaasukatkaisijoille. Hyväkuntoista laitetta ei pääsääntöisesti pitäisi huoltaa, joten perusteluita kytkinlaitteiden huoltovälien uudelleenarviointiin on. Laitteiden luotettavuuden ei uskota oleellisesti muuttuvan, vaikka huoltovälejä pidennettäisiin joillakin vuosilla. Eri laitteiden välillä havaittiin myös selviä eroja. Vika- ja kunnossapitotietojen avulla toimenpiteitä voidaan kohdentaa nykyistä tarkemmin. Aikaperustaisesta kunnossapitopolitiikasta voidaan siirtyä kohti kunterustaista kunnossapitoa.

Muokkaamalla maltillisesti huoltovälejä voidaan vuositasolla saavuttaa arviolta noin 40-60 k€ säästöt kytkinlaitteiden ennakoivan kunnossapidon kustannuksissa. Suorien kustannussäästöjen lisäksi keskeytysuunnittelu helpottuu ja säästetään sisäisiä resursseja.

Perusparannusten ajoittamiseen ei löydetty merkittäviä uusia kriteereitä. Nykyinen käytäntö todettiin toistaiseksi järkevimmäksi tavaksi. Perusparannusten ajoittamisen tulee perustua laiteryhmän määriteltyyn teknillistaloudelliseen pitoaikaan ja toisaalta todelliseen jäljellä olevaan tekniseen elinikään, joka perustuu kunnonvalvontamittauksiin, vikataajuuteen ja asiantuntija-arvioihin. Lisäksi on huomioitava rullaava asemakohtainen hankeniputus, jolla voidaan saavuttaa säästöjä yhdistelemällä sopivia projekteja mielekkäiksi kokonaisuuksiksi.

12 Lähdeluettelo

- [ABB04] ABB, nro. 1HSB435455-3 en 4 LTB245-550E-katkaisijan laitemanuaali, ABB Ludvika 11.05.2004, 103 s.
- [Berg98] Bergman Eva, "Vikatietojen tilastollinen analyysi -Sensuroinnin vaikutus Weibullmallien estimoinnissa", VTT 1998, 152 s.
- [Bert02] Bertling Lina, "Realibility Centred Maintenance for Electric Power Distribution Systems", väitöskirja Kungl Tekniska Högskolan 2002, 429 s.
- [Cra07] Cras C., EB-Elektron järjestämä koulutustilaisuus liittyen TPF-tyyppisten saksierottimien virtateiden täyshuoltoprojektiin, Vanajan kaasuturbiinilaitos 2007
- [EDF04] P. Carer, J. Aupied, G. Malarange, S. Gougeon, C. Spelleman, Electricité de France (EDF), "Experience Feedback and Maintenance Policies of Substations and Electrical Equipment in EDF's MV Distribution and LV Networks, and RTE's VHV and HV Networks", konferenssiartikkeli, IEEE 2004, 6 s.
- [FG02] Fingrid Oyj, "Kantaverkon peruskoulutus", Fingrid Oyj 2002, 400 s.
- [FG51005] Yli-Salomäki P. "Sähköaseman perustarkastus", Tekninen ohje 51005 Fingrid Oyj 2007, 3 s.
- [FG51006] Yli-Salomäki P. "Sähköasemien lämpökuvaus", Tekninen erittely Fingrid Oyj 2004, 1 s.
- [FG51008] Matilainen J. "Eristimien ultraäänimittaukset", Tekninen ohje 51008 Fingrid Oyj, 2006, 4 s.
- [FG52104] Matilainen J. "Katkaisijoiden kunnossapito", Tekninen ohje 52104 Fingrid Oyj 2002, 23 s.
- [FG52105] Matilainen J. "Eroittimien kunnossapito", Tekninen ohje 52105 Fingrid Oyj 2002, 4 s.
- [Goo00] Goodfellow, John W., "Applying Realibility Centered Maintenance (RCM) to Overhead Electric Utility Systems", IEEE konferenssiartikkeli 2000, 4 s.
- [H&R04] Höyland A., Rausand M. "System Reliability Theory: Models and Statistical Methods", Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics 2004, 629 s.

-
- [Hav06] Haveri P., "Kaupunkisähköaseman elinkaaren hallinta", diplomityö Teknillinen korkeakoulu 2006, 110 s.
- [Hyn07] Hynönen M., asiantuntijakeskusteluita (Fingrid Oyj)
- [Jon95] Jones, Richard B., "Risk-Based Management – A Reliability-Centered Approach", Gulf Publishing Company 1995, 281 s.
- [Kas07] Kasén P., asiantuntijakeskustelu (Fingrid Oyj)
- [KEJO97] Kemijoki OY liittymissopimus nro. 5061 liitteinen 1997, 32 s.
- [Lai07] Laitinen T., asiantuntijakeskusteluita (Fingrid Oyj)
- [Laj07] Lajunen P., asiantuntijakeskusteluita (Empower Oy)
- [Leh07] Lehto S., asiantuntijakeskustelu (ABB Oy)
- [Mou97] Moubray J., "Reliability-centered Maintenance", Industrial Press Inc. 1997, 423 s.
- [Nor05] Nordel, "Driftstörningsstatistik 2005", Nordel 2005, 189 s.
- [N/S07] NIST/SEMATECH, "e-Handbook of Statistical Methods", <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>, internet käsikirja, lainattu 4.2.2007
- [Pen07] Penttinen J., asiantuntijakeskustelu (Fortum Power and Heat Oy)
- [RCM02] Yli-Salomäki P., Matilainen J., Rautio S., katkaisijoiden ja erottimien RCM-analyysien Excel-taulukot, Fingrid 2002
- [R&V98] Rausand M., Vatn J. "Reliability Centered Maintenance", referoitu raportti teoksesta "Risk and Reliability in Marine Technology" Balkema 1998, 27 s.
- [Rin99] Rintala Kimmo, "Laitteiden tärkeyden huomioon ottaminen sähköasemien kunnossapidossa", diplomityö 1999 Teknillinen korkeakoulu, 76 s.
- [SFS96] Suomen standardoimisliitto SFS, "Sähköteknillinen sanasto, luotettavuus ja palvelun laatu", SFS 1996, 34 s.
- [Sie01] Siemens AG, "3AP2 FI" SF₆-katkaisijan käyttöohje, 2001, 112 s.
- [TVS97] Teollisuuden voimansiirron liittymissopimus liitteinen (TVS-kantaverkon osat ja alueverkkolähdöt), 1997, 25 s.
- [Väl07] Välimaa S., asiantuntijakeskustelu (Fingrid Oyj)

- [Yli02] Yli-Salomäki P., "Suurjännitelaitteiden luotettavuuskeskeinen kunnossapito",
liseniaattityö 2002 Teknillinen korkeakoulu, 94 s.
- [Yli07] Yli-Salomäki P., asiantuntijakeskusteluita (Fingrid Oyj)

LIITE 1: VIKOJEN JAKAUTUMINEN KOMPONENTEITTAIN**EROTTIMET**

Vioittunut osa	λ [1/a]	MTBF [a]	FFI (A=99 %) [a]	Käyttötoimenpiteen yhteydessä havaittujen vikojen osuus*	Soveltuva kunnossapitotehtävä
eristin	0,00488	2	4	7 %	UÄ-mittaus, asematarkastus
merkinanto/hälytyspiiri	0,00035	28	57	0 %	käyttö, huolto
ohjain, apukosketin	0,00194	5	10	<u>14 %</u>	käyttö, huolto
ohjain, kuivausvastukset	0,00149	7	13	0,5 %	asematarkastus
ohjain, moottori	0,00087	11	23	8 %	käyttö, huolto
ohjain, muu osa	0,00215	5	9	9 %	käyttö, huolto
ohjain, ohjaus-/lukituskela	0,00352	3	6	<u>20 %</u>	käyttö, huolto
ohjain, riviliitin	0,00037	27	55	2 %	käyttö, huolto
ohjain, vivusto/pyörästö	0,00088	11	23	5 %	käyttö, huolto
suojakytkin	0,00035	28	56	2 %	käyttö, huolto
virtatiet, kosketin	0,00764	1	3	9 %	käyttö, huolto, lämpökuvaus
virtatiet, liitin/palmikko	0,00392	3	5	1 %	huolto, lämpökuvaus
virtatiet, muu osa	0,00047	21	43	1 %	huolto, lämpökuvaus
virtatiet, nivel/laakeri	0,00221	5	9	2 %	huolto, lämpökuvaus
voimansiirto/tangosto	0,00220	5	9	<u>17 %</u>	käyttö, huolto

KATKAISIJAT

Vioittunut osa	SF ₆			Vähäöljy			Soveltuva kunnossapitotehtävä
	λ [1/a]	MTBF [a]	FFI** [a]	λ [1/a]	MTBF [a]	FFI** [a]	
eristin	0,0006	1 609	32	0,0021	471	9	UÄ-mittaus
jänn.jakokondensaattori	0,0000		0	0,0234	43	1	asematarkastus
katkaisupää, kosketin	0,0027	371	7	0,0013	754	15	DRM, avaava huolto
katkaisupää, muu osa	0,0021	483	10	0,0074	135	3	on-line valvonta, asematarkastus
katkaisupää, tiiviste	0,0222	45	1	0,0263	38	1	tus
laskuri	0,0000		0	0,0048	209	4	asematarkastus
mittari/mittalasi/osoitin	0,0060	166	3	0,0069	145	3	asematarkastus
ohjain, apukosketin	0,0023	439	9	0,0024	419	8	koestus, käyttö, huolto
ohjain, kuivaus/lämmitys	0,0133	75	2	0,0072	140	3	asematarkastus
ohjain, moottori/hydr.pumppu	0,0081	124	2	0,0056	179	4	koestus, käyttö, huolto
ohjain, muu osa	0,0083	121	2	0,0058	171	3	
ohjain, ohjauskela	0,0010	966	19	0,0021	471	9	huolto
ohjain, releistys	0,0014	690	14	0,0005	1 884	38	
ohjain, riviliitin	0,0019	536	11	0,0011	942	19	koestus, käyttö, huolto
painesäiliö/-venttiilit	0,0029	345	7	0,0032	314	6	koestus, käyttö, huolto
päävirtatieliitin	0,0027	371	7	0,0011	942	19	lämpökuvaus, asematarkastus
suojakytkin	0,0004	2 414	48	0,0024	419	8	koestus, käyttö, huolto
tiheysvahti	0,0060	166	3	0,0000			on-line valvonta
vaimennusjarru	0,0021	483	10	0,0188	53	1	huolto
voimansiirto/jouset	0,0031	322	6	0,0066	151	3	huolto
(tyhjä)	0,0008	1 207	24	0,0008	1 256	25	

*) Tiedot on annettu koestamisen mielekkyyden arvioimiseksi.

**) Vian etsintä eli FFI-väli on annettu vaatimalla 99 % käytettävyyttä.

LIITE 2: VIKAMUOTOMATRIISIT

EROTTIMET

Vioittunut osa	Epäpuhtaudet	Eristysvika	Kosketuspinnan palaminen/kuluminen	Laitteen ulkopuolinen vika	Löysä liitos/kosketushäiriö	Materiaalivirhe	Mekaaninen vaurio	Rasvan puute	Viallinen komponentti	Virheellinen kytkentä	Virheelliset säädöt	Öljyvuo	(tyhjä)	Kaikki yhteensä
eristin				5			106				2		1	114
merkinanto/hälytyspiiri		2							4		1			7
ohjain, apukosketin	4			1	8		3		16	1	10		1	44
ohjain, kuivaus/lämmitys		4		3					30					37
ohjain, moottori		7	1		1		1		9		1			20
ohjain, muu osa	2	1	1	5	4		10		8		4	3	6	44
ohjain, ohjaus-/lukituskela	2	13		1			13	9	30	2	16		1	87
ohjain, riviliitin			1	1	4		1		1					8
ohjain, vivusto/pyörästö	3			2			7	3	1		3	3		22
suojakytin	1					1			4				1	7
virtatiet, kosketin	5		20	3	5	5	2	78	3		47		2	170
virtatiet, liitin/palmikko	18		8	2	37		6	17			2			90
virtatiet, muu osa	1					1	1	4			4			11
virtatiet, nivel/laakeri	1				5	9	3	15	2		1		1	37
voimansiirto/tangosto				2		4	9	25			17		1	58
(tyhjä)				7									1	8
Kaikki yhteensä	37	27	31	32	64	20	162	151	108	3	108	6	15	764

SF₆-katkaisijat

Vioittunut osa	Epäpuhtaudet	Eristysvika	Kaasupaine alhainen	Kosketuspinnan palaminen/Kuluminen	Laitteen ulkopuolinen vika	Löysä liitos/kosketushäiriö	Materiaalivirhe	Mekaaninen vaurio	Rasvan puute	Vaallinen komponentti	Virheellinen johdotus	Virheelliset säädöt	Öljyvuohto	(tyhjä)	Kaikki yhteensä
eristin					2			1							3
katkaisupää, kosketin				8				2						3	13
katkaisupää, muu osa			3		1			4						2	10
katkaisupää, tiiviste			107												107
mittari/mittalasi/osoitin	1		1				1			19		6		1	29
ohjain, apukosketin				1		5				1		4			11
ohjain, kuivaus/lämmitys		2			7	1				47	2	4		1	64
ohjain, mootto- ri/hydr.pumppu	3	2								5		9	19	1	39
ohjain, muu osa	1		1		2	2		10	1		1	4	13	5	40
ohjain, ohjauskela		1				2				2					5
ohjain, releistys										5		2			7
ohjain, riviliitin						6		2			1				9
painesäiliö/-venttiilit			4							1		5	4		14
päävirtatieliitin	11					2									13
suojakytkin										1				1	2
tiheysvahti			8		1	1	1			6		9		3	29
vaimennusjarru												1	9		10
voimansiirto/jouset	6							6				3			15
(tyhjä)					1									3	4
Kaikki yhteensä	22	5	124	9	14	19	2	25	1	87	4	47	45	20	424

Vähäjykatkaisijat

Voittunut osa	Epäpuhtaudet	Eristysvika	Kaasupaine alhainen (typpiä)	Kosketuspinnan palaminen/kuluminen	Laitteen ulkopuolinen vika	Löysä liitos/kosketushäiriö	Mekaaninen vaurio	Rasvan puite	Vaallinen komponentti	Virheellinen johdotus	Virheelliset säädöt	Öljyvuo	(tyhjä)	Kaikki yhteensä
eristin							9						2	8
jänn.jakokondensaattori							3		2			83		88
katkaisupää, kosketin		1		1							1		2	5
katkaisupää, muu osa	2	3	5				2		2		1	8	5	28
katkaisupää, tiiviste			25	1								71	2	99
laskuri									9		9			18
mittari/mittalasi/osoitin	11						3		4		1	7		26
ohjain, apukosketin	2					2			1	2	1		1	9
ohjain, kuivaus/lämmitys						1			19		3		4	27
ohjain, moottori/hydr.pumppu	6	1	1						1		2	10		21
ohjain, muu osa	1						1				2	15	3	22
ohjain, ohjaukela		2				1	2		3					8
ohjain, releistys		1							1					2
ohjain, riviliitin						2	1			1				4
painesäiliö/-venttiilit			5						5			2		12
päävirtatieliitin						4								4
suojakytin						2			5		2			9
vaimennusjarru							3		6		3	58	1	71
voimansiirto/jouset	4						15	1			2	1	2	25
(tyhjä)					1								2	3
Kaikki yhteensä	26	8	36	2	1	12	36	1	58	3	27	255	24	489

LIITE 3: VIKOJEN JAKAUTUMINEN OSAN JA HAVAINTOTAVAN MUKAAN**EROTTIMET**

Osa	Havaintotapa	Vikojen määrä	Osuus
eristin	Asematarkastus	19	17 %
	Huolto (kp.toimenpide)	37	32 %
	Häiriö	3	3 %
	Koestus	1	1 %
	Käyttötoimenpiteen yht.	14	12 %
	Satunnainen havainto	1	1 %
	Ultraäänimittaus	39	34 %
	Yhteensä	114	100 %
Ohjain, sähköiset	Asematarkastus	26	12 %
	Huolto (kp.toimenpide)	67	32 %
	Häiriö	2	1 %
	Hälytys	8	4 %
	Koestus	6	3 %
	Käyttötoimenpiteen yht.	99	47 %
	Satunnainen havainto	2	1 %
	Yhteensä	210	100 %
Ohjain, mekaaniset	Asematarkastus	15	12 %
	Huolto (kp.toimenpide)	27	22 %
	Häiriö	1	1 %
	Hälytys	1	1 %
	Koestus	2	2 %
	Käyttötoimenpiteen yht.	66	53 %
	Lämpökuvaus	2	2 %
	Satunnainen havainto	10	8 %
Yhteensä	124	100 %	
Virtatiet	Asematarkastus	6	2 %
	Huolto (kp.toimenpide)	142	46 %
	Häiriö	2	1 %
	Koestus	2	1 %
	Käyttötoimenpiteen yht.	29	9 %
	Lämpökuvaus	116	38 %
	Satunnainen havainto	11	4 %
	Yhteensä	308	100 %

KATKAISIJAT

Vioittunut osa	Havaintotapa	SF6	Osuus	Vähäöljy	Osuus
eristin	Asematarkastus			1	13 %
	Huolto (kp.toimenpide)			2	25 %
	Häiriö	1	33 %	2	25 %
	Koestus			2	25 %
	Käyttötoimenpiteen yht.	1	33 %		
	Satunnainen havainto	1	33 %	1	13 %
	Yhteensä	3	100 %	8	100 %
jänn.jakokondensaattori	Asematarkastus			47	53 %
	Huolto (kp.toimenpide)			33	38 %
	Käyttötoimenpiteen yht.			1	1 %
	Satunnainen havainto			7	8 %
	Yhteensä			88	100 %
katkaisupää	Asematarkastus	25	19 %	85	64 %
	Huolto (kp.toimenpide)	15	12 %	20	15 %
	Häiriö	3	2 %	3	2 %
	Hälytys	62	48 %	2	2 %
	Koestus	2	2 %		
	Käyttötoimenpiteen yht.	1	1 %	6	5 %
	Lämpökuvaus	2	2 %		
	Satunnainen havainto	20	15 %	15	11 %
	(tyhjä)		0 %	1	1 %
	Yhteensä	130	100 %	132	100 %
ohjain, sähköiset	Asematarkastus	44	32 %	25	31 %
	Huolto (kp.toimenpide)	8	6 %	6	8 %
	Häiriö	1	1 %	8	10 %
	Hälytys	56	41 %	20	25 %
	Koestus	6	4 %	7	9 %
	Käyttötoimenpiteen yht.	11	8 %	11	14 %
	Satunnainen havainto	11	8 %	3	4 %
	Yhteensä	137	100 %	80	100 %
ohjain, mekaaniset	Asematarkastus	30	38 %	73	56 %
	Huolto (kp.toimenpide)	20	25 %	40	31 %
	Häiriö	5	6 %	3	2 %
	Hälytys	7	9 %	5	4 %
	Koestus	4	5 %	1	1 %
	Käyttötoimenpiteen yht.	9	11 %	6	5 %
	Satunnainen havainto	4	5 %	2	2 %
	Yhteensä	79	100 %	130	100 %
mittaristo	Asematarkastus	15	26 %	30	68 %
	Huolto (kp.toimenpide)	17	29 %	11	25 %
	Hälytys	14	24 %		
	Koestus	5	9 %		
	Käyttötoimenpiteen yht.	3	5 %		
	Satunnainen havainto	4	7 %	3	7 %
Yhteensä	58	100 %	44	100 %	
päävirtatieliitin	Huolto (kp.toimenpide)	1	8 %	1	25 %
	Lämpökuvaus	12	92 %	3	75 %
	Yhteensä	13	100 %	4	100 %

LIITE 4: HUOLLOISSA KIRJATUT VIAT 1998-2006

EROTINHUOLLOISSA KIRJATUT LAITEVIKAILMOITUKSET 1998-2006

Vioittunut osa	Kaikki yhteensä	Osuus
eristin	37	13 %
ohjain, apukosketin	10	4 %
ohjain, kuivaus/lämmitys	18	6 %
ohjain, moottori	2	1 %
ohjain, muu osa	7	3 %
ohjain, ohjaus-/lukituskela	33	12 %
ohjain, riviliitin	2	1 %
ohjain, vivusto/pyörästö	5	2 %
suojakytkin	2	1 %
virtatiet, kosketin	78	28 %
virtatiet, liitin/palmikko	52	19 %
virtatiet, muu osa	5	2 %
virtatiet, nivel/laakeri	8	3 %
voimansiirto/tangosto	16	6 %
Ei mainintaa	2	1 %
Huollossa havaitut viat yhteensä	277	
Huollossa havaitut Major-viat	9	
Huoltojen määrä	3164	
Huolloissa havaittujen vikojen määrä / huoltojen määrä	9 %	
Huollossa havaittujen Major-vikojen määrä / huoltojen määrä	0,3 %	

KAASUKATKAISIJAHUOLLOISSA KIRJATUT VIKAILMOITUKSET 1998-2006

Vioittunut osa	Kaikki yhteensä	Osuus
katkaisupää, kosketin	7	11 %
katkaisupää, muu osa	2	3 %
katkaisupää, tiiviste	6	10 %
mittari/mittalasi/osoitin	11	18 %
ohjain, apukosketin	1	2 %
ohjain, kuivaus/lämmitys	2	3 %
ohjain, moottori/hydr.pumppu	4	7 %
ohjain, muu osa	7	11 %
ohjain, releistys	1	2 %
painesäiliö/-venttiilit	4	7 %
päävirtatieliitin	1	2 %
tiheysvahti	6	10 %
vaimennusjarru	2	3 %
voimansiirto/jouset	7	11 %
Huollossa havaitut viat yhteensä	61	
Huollossa havaitut Major-viat	2	
Huoltojen määrä	617	
Huolloissa havaittujen vikojen määrä / huoltojen määrä	10 %	
Huollossa havaittujen Major-vikojen määrä / huoltojen määrä	0,3 %	

VÄHÄÖLJYKATKAISIJOIDEN HUOLLOISSA KIRJATUT VIKAILMOITUKSET 1998-2006

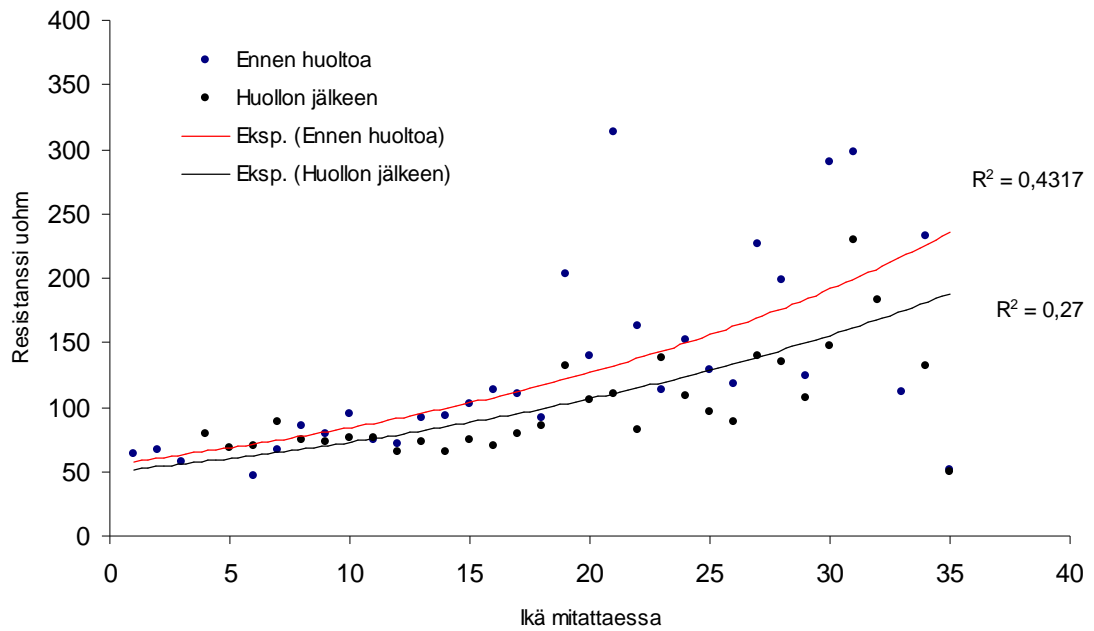
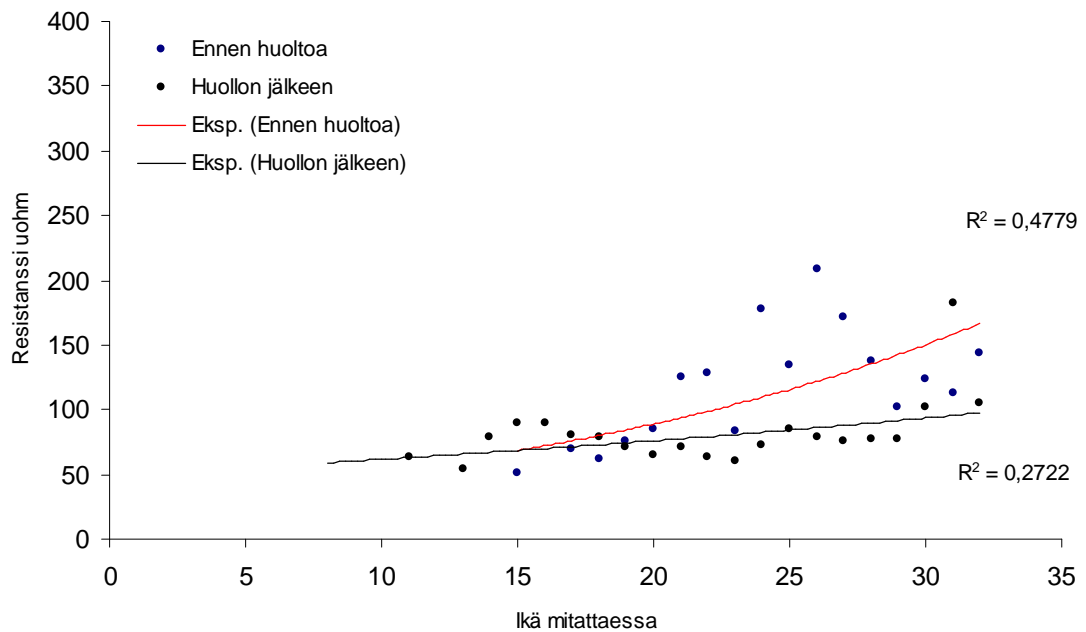
Vioittunut osa	Kaikki yhteensä	Osuus
eristin	2	2 %
jänn.jakokondensaattori	33	29 %
katkaisupää, kosketin	3	3 %
katkaisupää, muu osa	5	4 %
katkaisupää, tiiviste	12	11 %
laskuri	7	6 %
mittari/mittalasi/osoitin	4	4 %
ohjain, kuivaus/lämmitys	2	2 %
ohjain, moottori/hydr.pumppu	1	1 %
ohjain, muu osa	2	2 %
painesäiliö/-venttiilit	4	4 %
päävirtatieliitin	1	1 %
suojakytkin	3	3 %
vaimennusjarru	21	18 %
voimansiirto/jouset	13	11 %
Ei mainintaa	1	1 %
Huollossa havaitut viat yhteensä	114	
Huollossa havaitut Major-viat	8	
Huoltojen määrä	772	
Huolloissa havaittujen vikojen määrä / huoltojen määrä	15 %	
Huollossa havaittujen Major-vikojen määrä / huoltojen määrä	1,0 %	

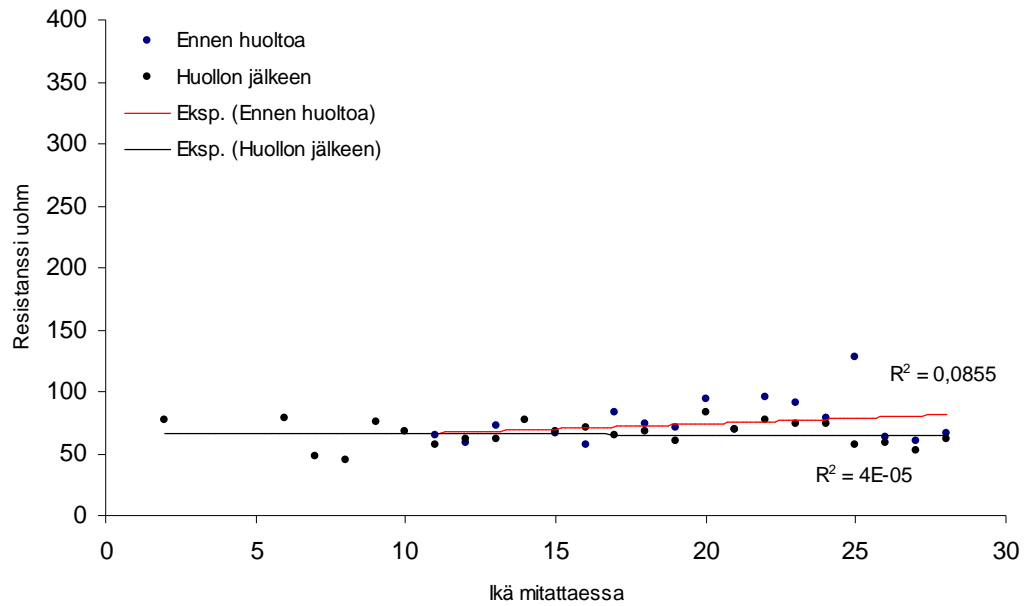
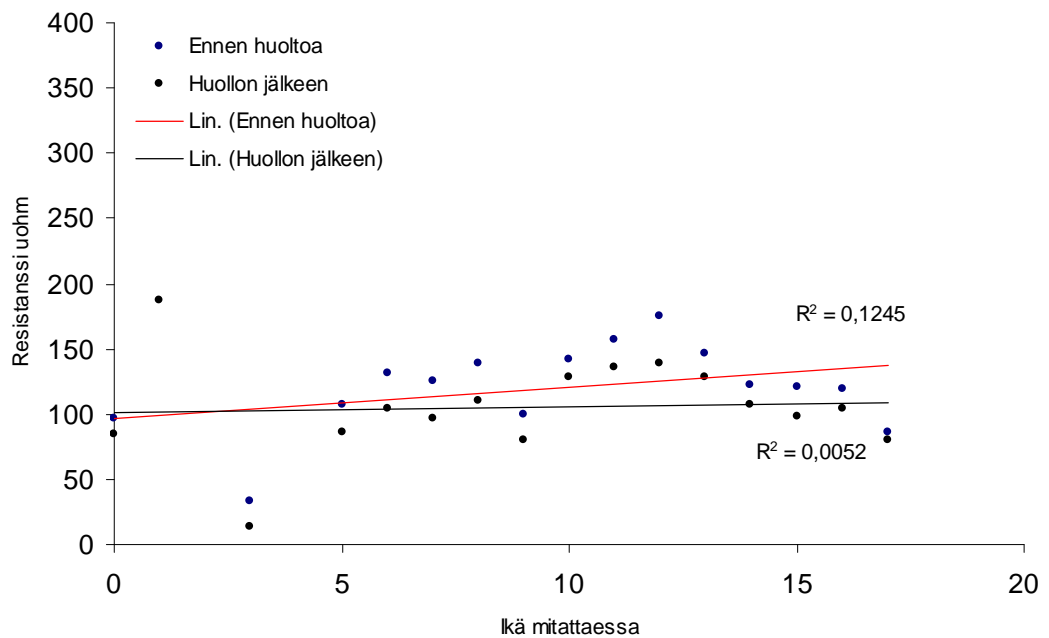
LIITE 5: EROTTIMIEN YLIMENORESISTANSSIMITTAUKSET

Tyyppi	Rooli	Ennen huoltoa [$\mu\Omega$]	Huollon jälkeen [$\mu\Omega$]	Huollon vaikutus [%]	Aika edellisestä huollosta [a]	Keski-ikä mitattaessa [a]
OJYD	KAIKKI	119,0	93,7	27 %	7,58	22,6
OJYD	MUUNTAJAEROTIN	91,0	85,3	7 %		
OJYD	JOHTOEROTIN	105,2	89,1	18 %		
OJYD	KISKOEROTIN	119,1	94,6	26 %		
OJYD	OHIKYTKENTÄEROTIN	175,6	107,1	64 %		
OJYD	REAKTORIEROTIN	70,5	56,6	24 %		
OJYD	RC-EROTIN	93,5	76,3	22 %		
SSB	KAIKKI	115,6	102,0	13 %	6,97	13,5
SSB	MUUNTAJAEROTIN	99,3	95,4	4 %		
SSB	JOHTOEROTIN	121,4	106,6	14 %		
SSB	KISKOEROTIN	97,2	88,4	10 %		
SSB	KORPIEROTIN	101,3	91,3	11 %		
SSB	OHIKYTKENTÄEROTIN	118,2	102,4	15 %		
OJYW	KAIKKI	78,0	66,8	17 %		
OJYW	MUUNTAJAEROTIN	95,3	81,4	17 %		
OJYW	KISKOEROTIN	78,6	68,6	15 %		
OJYW	OHIKYTKENTÄEROTIN	75,3	61,0	23 %		
UEV	KAIKKI	217,2	172,6	26 %	3,56	29,4
UEV	MUUNTAJAEROTIN	205,1	189,9	8 %		
UEV	JOHTOEROTIN	213,6	175,1	22 %		
UEV	KISKOEROTIN	194,3	168,1	16 %		
UEV	OHIKYTKENTÄEROTIN	242,4	170,5	42 %		
OJYC	KAIKKI	106,6	107,1	-1 %	7,31	29,5
OJYC	MUUNTAJAEROTIN	66,3	61,5	8 %		
OJYC	KISKOEROTIN	102,4	91,0	13 %		
OJYC	OHIKYTKENTÄEROTIN	139,6	92,7	51 %		
GSSB	KAIKKI	219,0	94,5	132 %	6,67	13,5
GSSB	MUUNTAJAEROTIN	67,9	64,6	5 %		
GSSB	KISKOEROTIN	164,7	99,4	66 %		
GSSB	OHIKYTKENTÄEROTIN	106,8	94,6	13 %		
TPF	KAIKKI	336,1	136,0	147 %	7,68	25,9
TPF	MUUNTAJAEROTIN	309,4	117,7	163 %		
TPF	KISKOEROTIN	366,2	139,4	163 %		
TPF	OHIKYTKENTÄEROTIN	242,7	126,7	91 %		
D300	KAIKKI	178,3	136,3	31 %	8	8,7
D300	MUUNTAJAEROTIN	186	159,8	16 %		
D300	JOHTOEROTIN	168,6	154,8	9 %		
D300	KISKOEROTIN	126,5	126,1	0 %		

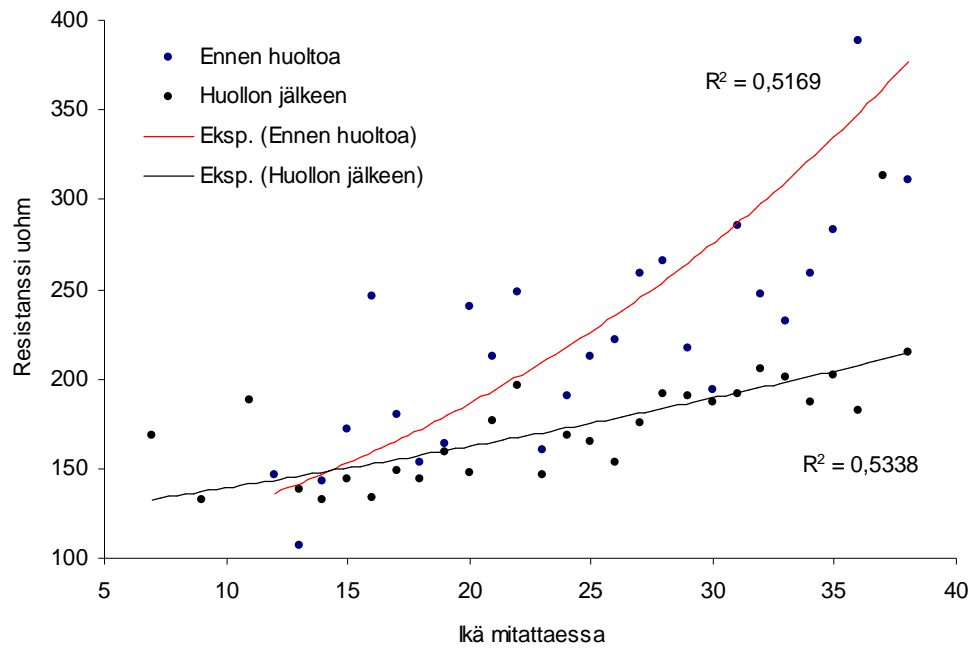
OJON	KAIKKI	66,5	47,7	39 %	8,7	35,1
FV	KAIKKI	176,6	102,8	72 %	6,7	28,3
FV	MUUNTAJAEROTIN	100,8	72,4	39 %		
FV	KISKOEROTIN	137,7	95,7	44 %		
FV	OHIKYTKENTÄEROTIN	257,8	114,8	125 %		
SGF	KAIKKI	165,83	158,44	5 %	4,8	13,5
VSSB	KAIKKI	122,13	109,03	12 %		7,2
UEA	KAIKKI	434,14	304,72	42 %	4,3	44,3
UEA	MUUNTAJAEROTIN	429,22	311,79	38 %		
UEA	JOHTOEROTIN	329,15	276,29	19 %		
UEA	KISKOEROTIN	360,74	258,66	39 %		
UEA	OHIKYTKENTÄEROTIN	626,8	367,3	71 %		
KAIKKI	JOHTOEROTIN	128,8	111,4	16 %		
KAIKKI	MUUNTAJAEROTIN	179,40	131,20	37 %		
KAIKKI	KISKOEROTIN	181,85	119,67	52 %		
KAIKKI	OHIKYTKENTÄEROTIN	202,13	127,55	58 %		
KAIKKI	TÄHTIPISTE-EROTIN	230,74	193,74	19 %		
KAIKKI	APUKISKOEROTIN	323,08	102,92	214 %		

Tyyppi	Ylimenoresistanssin arvon suositeltavat vaihteluvälit (ilman liittimiä) [$\mu\Omega$]
TPF216D	<200
OJYW1-420A3150	<140
OJYC420/1Y2	<120
TFZE420/6	<200
TPF414	<140
OJYD3-123A2500	<150
OJYW3-123A3150	<90
OJYD3-123C1250	<120
OJYC123X1	<110
UEV13-123/1600	<220

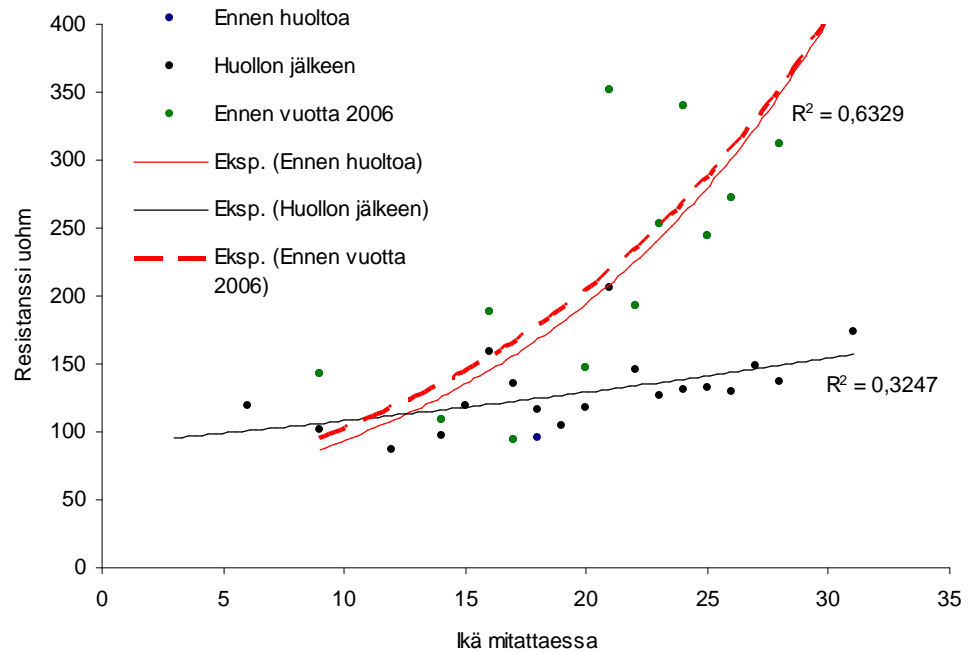
OJYD (2-pilarinen kiertoerotin)**OJYC (3-pilarinen kiertoerotin)**

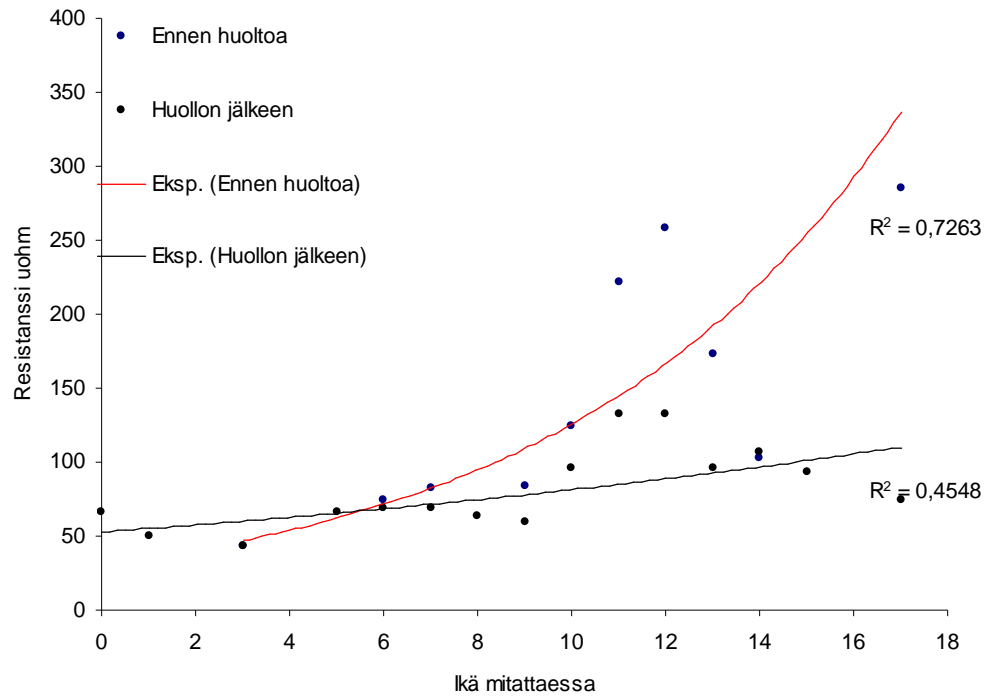
OJYW (Vertikaalinen polvierotin)**SSB-II (2-pilarinen kiertoerotin)**

UEV (2-pilarinen kierotin)



TPF (saksierotin, virtatiet huonossa kunnossa)



GSSB (saksierotin)*

*) GSSB:n ylimenoresistanssin kehitys näyttää huolestuttavalla tavalla samanlaiselta kuin TPF-erottimilla. Jos tätä voidaan pitää indikaattorina virtateiden kunnosta, kannattaa saksierottimia huoltaa useammin tai eri tavalla.

LIITE 6: KATKAISIJOIDEN TOIMINTA-AIKAMITTAUKSET**AUKI-KIINNI TOIMINTA-AIKAMITTAUKSET**

Tyyppi	Keskiarvo [ms]		Keskihajonta [ms]		Suurin arvo [ms]		Mittauksia
	Kiinni	Auki	Kiinni	Auki	Kiinni	Auki	
HGF116/2B	137,4	27,5	7,4	7,0	173,3	142,2	555
HGF111/1C	130,6	27,1	15,4	3,1	429,2	128,9	2463
HPL123	90,6	21,9	80,7	0,8	361,5	24,4	321
HPL245	63,4	21,1	7,3	1,2	83,2	24,5	312
HPL420	54,7	18,8	0,9	1,2	56,4	20,7	42
LTB145	32,5	22,7	6,9	1,0	79,1	27,0	286
S1-123	88,0	36,6	6,5	2,0	99,0	39,8	204
HLR123	112,4	32,5	10,3	3,9	207,6	115,3	1284
HLR145	116,1	34,8	50,5	3,0	410,8	46,7	216
HLR245	108,1	22,2	1,3	0,5	109,5	23,0	18
HLR420	130,9	33,7	2,0	1,0	132,8	35,2	18
HPF300	145,7	26,9	6,4	2,3	160,0	36,2	701
HPF500	140,7	23,3	16,4	6,0	150,3	35,6	2713

Aukiohjauksen (katkaisun) tulisi olla alle 40 ms

Katkisijan ja ohjaimen tyyppi	Ylimenovastus (ilman liittimiä) [$\mu\Omega$]	Toiminta-aika (kiinni/auki) [ms]	Ohjaimen viritysaika [s]	Kelan vetojännite ($U_n=110V/220V$) [V]
HGF116/2B (FKF2-6)	<100	130-150/25-30	8-15	-/<165
HPL245/25B1 (BLG1002)	<70	55-70/19-25	10-15	-/<140
HGF111/1C (FKF2-6)	<60	120-140/22-30	8-15	<85/<165
HPF511M/2F (FKF1-6)	<180	140-150/20-25	10-18	-/<130
HPF516T/8C (FKF1-6)	-	140-150/22-30	10-15	-/<150
HLR123/2501E1 (BLG352)	<90	105-120/25-35	10-15	<85/<165

NAPOJEN ERIAIKAISUUS (Sallittu noin 3 ms)

Tyyppi	Keskiarvo [ms]		Keskihajonta [ms]		Suurin arvo [ms]		Mittauksia
	Kiinni	Auki	Kiinni	Auki	Kiinni	Auki	
HGF116 2B	1,31	0,22	1,02	0,24	4,5	1,3	68
HGF111 1C	0,44	0,25	0,47	0,19	2,2	0,8	210
HPL123	1,17	0,69	1,8	1,12	6,8	4,1	43
HPL245	0,9	0,32	0,93	0,29	4	1,2	64
LTB145	0,53	0,43	0,91	1,01	5,2	5,6	60
S1-145	0,81	0,78	0,5	0,41	1,6	1,3	28
HLR123	0,6	1,16	0,46	0,54	1,8	2,6	144
HLR145	0,65	0,51	0,56	0,47	2	1,8	22
HPF300	1,1	1,51	0,88	0,88	2,4	2,7	18
HPF500	0,67	0,23	0,59	0,26	3,3	1,3	226