

Jälleenkytkentöjen päivitystarpeet

Pertti Pakonen

Tampereen yliopisto

Energia-alan tutkimusseminaari, Vantaa

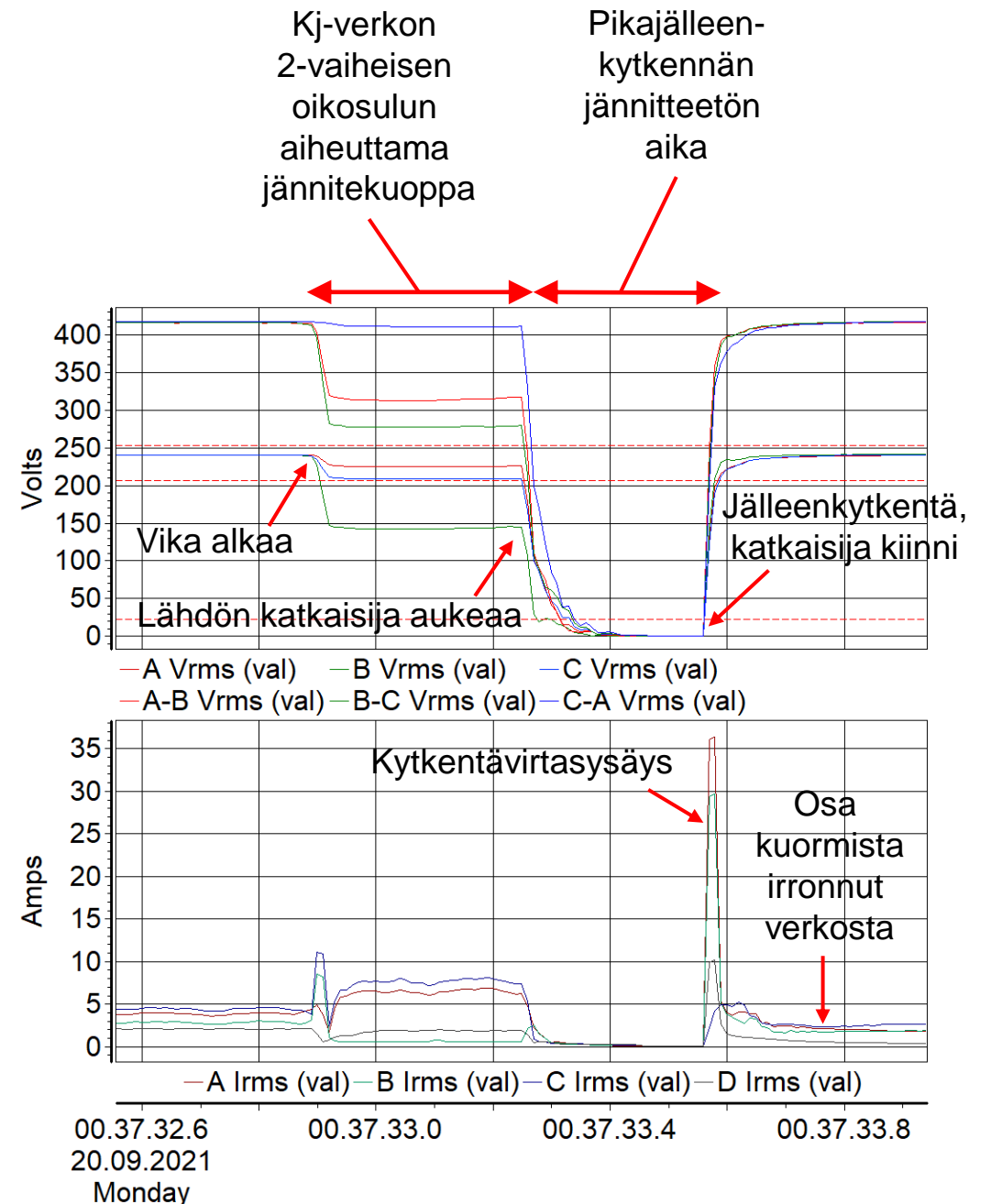
7.2.2023

Tutkimuksen tausta (1)

- Jälleenkytkennät ja niihin liittyvät lyhyet keskeytykset ovat osa sähköverkon ohimeneviin oikosulku- ja maasulkuvikoihin liittyviä toimintoja, joilla pyritään vähentämään verkon pysyviä vikoja ja lyhentämään asiakkaan kokemaa keskeytysaikaa.
- Nykyiset jälleenkytkentöjen käytännöt perustuvat suurelta osin vuosikymmenien takaiseen teknologiaan ja ajattelutapaan. Sähköjakelujärjestelmä, suojausteknologia ja asiakaslaitteiden tekniikka ovat kuitenkin muuttuneet tänä aikana merkittävästi.
 - Erityisesti tehoelektroniikan ja automaation lisääntyminen on vaikuttanut asiakaslaitteiden käyttäytymiseen jälleenkytkennöissä.
 - Hajautetut energioresurssit (hajautettu tuotanto, akkuvarastot ym.) ovat lisääntyneet.
- Em. muutosten pohjalta on noussut tarve jälleenkytkentäkäytäntöjen ja erityisesti pikajälleenkytkennän jännitteettömän ajan uudelleentarkasteluun.

Tutkimuksen tausta (2)

- Esimerkkikuva pj-verkon mittauksista hankkeessa:
 - Vaihe- ja pääjännitteiden sekä vaihevirtojen 10 ms välein 20 ms jaksoilta lasketut tehollisarvot taajuusmuuttajakuormaa syöttävän keskuksen syötössä, kun
 - 20 kV verkossa tapahtuu 2-vaiheisen oikosulkuvian seurauksena pikajälleenkytkentä, joka selvittää vian
- Vian poistumistodennäköisyyteen jälleenkytkennän seurauksena vaikuttaa
 - Jälleenkytkennän jännitteetön aika (oltava riittävä vikavalokaaren aiheuttaman ilman ionisaation hajaantumiseen)
 - Suojareleen laukaisuhidastus (vian ”polttoaika”)
- Jälleenkytkennän aiheuttamiin haittoihin vaikuttaa
 - Kaikissa vioissa (sekä maasulku- että oikosulkuviat) vikalähdöllä jälleenkytkennän jännitteetön aika
 - Oikosulkuvioissa koko sähköaseman alueella suojareleen laukaisuhidastus => jännitekuopan kestoaika
 - Kuopan aikaisen jännite-epäsymmetrian vaikutus riippuu paljolti laitteesta



Tutkimuksen toteutus

1. Katsaus pikajälleenkytkentöihin liittyvään standardointiin ja aiempiin tutkimuksiin
2. Verkkoyhtiöihin suunnattu kyselytutkimus (jakelu Energiateollisuus ry:n kautta)
3. Vikatilastojen ja häiriötallenteiden analysointi
4. Laboratoriomittaukset valituille laitteille
5. Kenttämittaukset asiakaskohteissa
6. Johtopäätökset ja suositukset

Yhteistyökumppaneina kohtien 3. ja 5. osalta

- Elenia Oy
- Vaasan Sähköverkko Oy

Hankkeen resurssit

- Henkilöresurssit:
 - Vastuullinen johtaja: prof. Pekka Verho
 - Projektipäällikkö: TkT Pertti Pakonen
 - Asiantuntija: TkT Ari Nikander
- Toteutusaikataulu: 6/2021 - 11/2022
- Kokonaistyömäärä: 6 htkk
- Rahoitus: Sähkötutkimuspooli



Jälleenkytkentöihin liittyvä standardointi (1)

- Lyhin mahdollinen pikajälleenkytkennän jännitteetön aika määräytyy vikavalokaaren aiheuttaman ilman ionisaation hajaantumiseen tarvittavasta ajasta. Tähän vaikuttaa mm. jännite, johdinvälien ja vikavirran suuruus ja sääolosuhteet.
- Standardissa IEEE Std C37.104, 2012, *IEEE Guide for Automatic Reclosing of Circuit Breakers for AC Distribution and Transmission Lines* annetaan jännitteettömäksi ajaksi t_d :

$$t_d = 10.5 + \frac{U_{L-L}}{34.5}$$

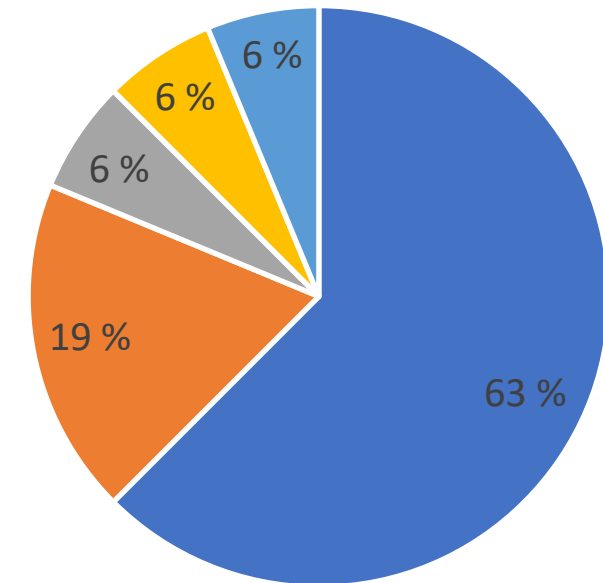
missä t_d on aika verkkojaksoina. Esimerkiksi 21.0 kV jännitteellä tämä olisi 11-12 täyttä verkkojaksoa ($t_d \approx 222$ ms).

Jälleenkytkentöihin liittyvä standardointi (2)

- Sähkölaitteita koskevissa EMC-standardeissa on määritelty sietotestaus-vaatimukset myös jännitekuopille ja lyhyille keskeytyksille
 - vaatimukset ovat melko suppeat (esim. IEC 61000-4-11:2020, SFS-EN 61800-3:2018)
- Keskeytysten sietoa testataan yhdellä testillä:
 - 0 % jäännösjännite (kaikissa kolmessa vaiheessa) 250 jakson ajan (5.0 s)
- Jännitekuoppatesteissä osana lisäksi:
 - 0 % jäännösjännite puolen jakson ajan (10 ms)
 - 0 % jäännösjännite yhden jakson ajan (20 ms)
- Laitteiden toiminnalliset vaatimukset esim. taajuusmuuttajien osalta keskittyvät
 - turvallisuuteen (esim. moottori ei saa käynnistyä, jos se oli ennen katkoa pysäyksissä) ja
 - siihen, että mm. laitteen asetusten tulee säilyä laitteen muistissa
- Tästä näkökulmasta on ymmärrettävää, että nykyisin yleisesti käytössä olevilla pikajälleenkytkennän jännitteettömillä ajoilla 0,3...0,4 s ongelmia voi esiintyä.

Verkkoyhtiöihin suunnattu kyselytutkimus

- Kyselyyn vastasi yhteensä 16 verkkoyhtiötä
 - Sekä maaseutumaisia että kaupunkiverkkoyhtiöitä, maantieteellinen kattavuus hyvä
 - Kj-avojohtoverkkoa yhtiöillä yhteensä noin 45 000 km, kj-kaapeliverkkoa noin 28 000 km
- Kipinävälisuoja oli käytössä vielä melko runsaasti, niiden yhtiöiden osalta, jotka ilmoittivat lukumääriä tai lukumääräarvioita, kokonaissumma oli 5622 kpl.
- 63 %:lla yhtiöistä oli käytössä sekä pika- että aikajälleenkytkentä.

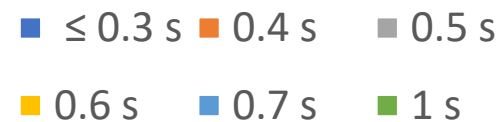
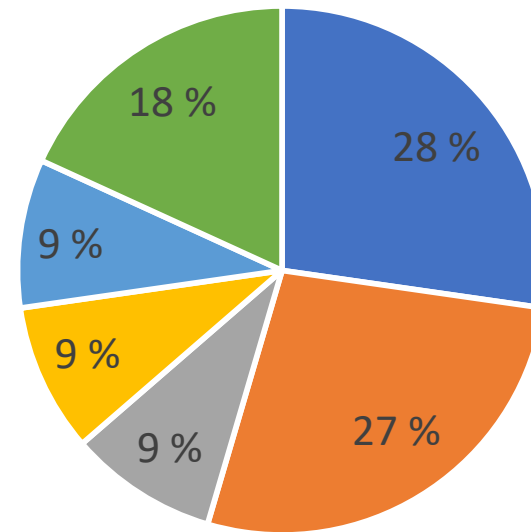


Jälleenkytkentöjen jännitteettömät ajat (t_d)

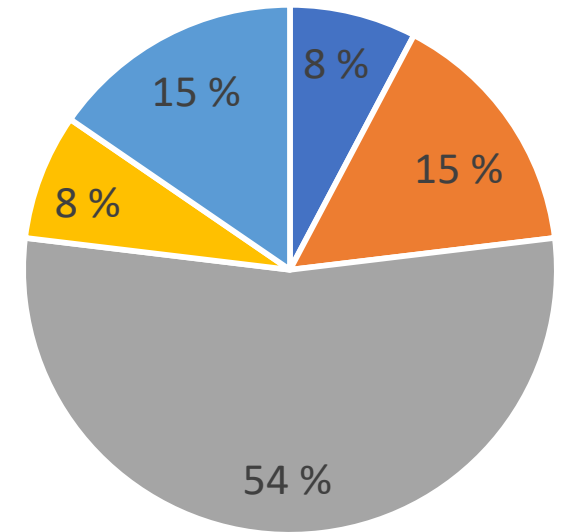
Kyselytutkimuksen mukaan:

- Yli puolella (55 %) yhtiöistä käytössä $t_d \leq 0.4$ s
- Noin neljällä viidestä (82 %) $t_d \leq 0.7$ s
- Kaksi yhtiötä oli jo siirtynyt pjk:n osalta 0,3...0,5 s jännitteettömästä ajasta 0,7 tai 1,0 sekuntiin
- Kaksi yhtiötä oli siirtymässä vähitellen 0,3 s pjk:sta 1 s pjk:hon tai 30 s hjk:hon (hidastettu jälleenkytkentä)
- Kokemukset pidemmistä ajoista positiivisia

PJK:n
jännitteetön aika



AJK:n
jännitteetön aika

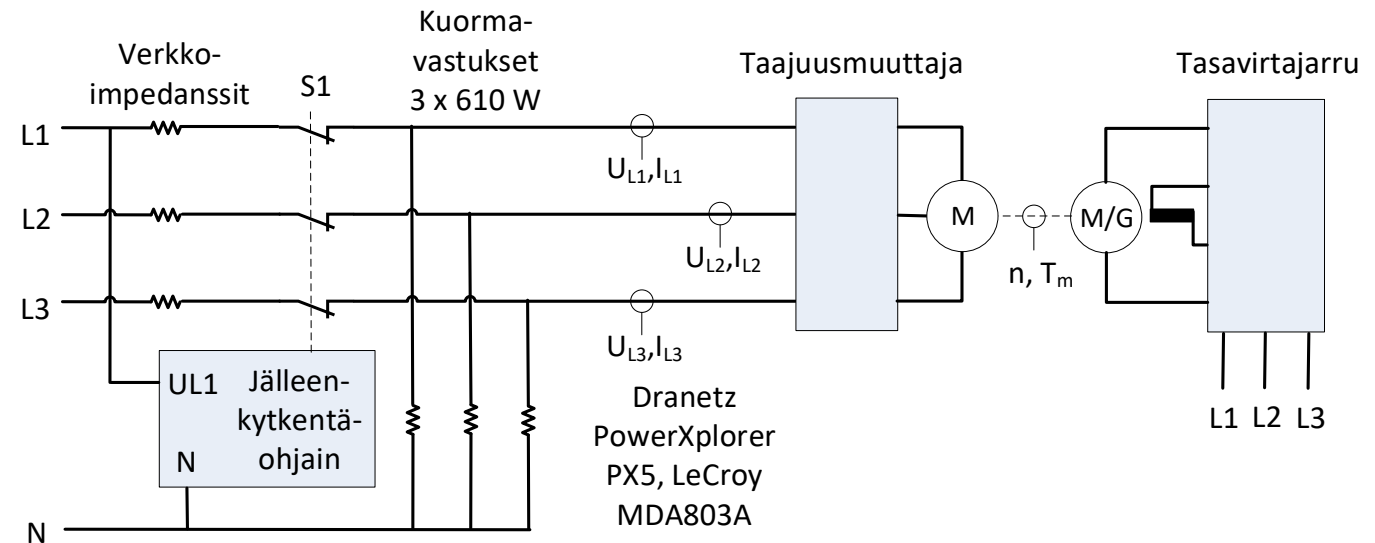


Jälleenkytkentöjen aiheuttamat haitat

- Kyselytutkimuksen perusteella ainakin seuraavat laitteet ovat herkkiä häiriintymään jälleenkytkennöistä:
 - Valmistavan teollisuuden tuotantolinjat, taajuusmuuttajakäytöt sekä logiikka/automaatiokomponentit
 - Tietokoneet, logiikkapiirit, automaattiset työstökoneet
 - Lämpöpumput (maalämpö, mutta myös muut), pellettilämmitykset
 - Pienelektroniikan laitteet (mikrot, kelloradiot ym.)
 - Jääkaappipakastimien kompressorit (jäävät “jurraamaan” katkojen jälkeen)
- Asiakkailta on tullut jälleenkytkentöihin liittyen myös korvausvaatimuksia mm. seuraavista laitteista/komponenteista:
 - Teholähteet, ohjainkortit, automaatiolaitteet, kotitalouslaitteet ja –elektroniikka
- Laitteaurioiden juurisyyn selvittäminen on usein vaikeaa ja korvauksia ei yleensä ole maksettu (laitteiden tulisi kestää jälleenkytkentä).

Laboratoriomittaukset

- Laitteiden jälleenkytkentätesteissä varioitiin:
 - Jälleenkytkennän jännitteetöntä aikaa (0,3-0,5-0,7-1-2-5-10 s)
 - Jännitteen vaihekulmaa ($\text{POW} = 30^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$), jolla kontaktori S1 aukesi ja sulkeutui jälleenkytkennässä
 - Taajuusmuutajakäytön osalta moottorin kuormitusmomenttia (7 %, 25 %, 50 %, 75 % ja 100 % nimellisestä)
- Testit koostuivat
 - Toiminnallisista testeistä
 - Vaihevirtojen (ja jännitteiden) mittauksesta jälleenkytkentöjen yhteydessä



- Tutkitut laitteet:
 - Taajuusmuutajakäyttö ($P_n = 5,5 \text{ kW}$)
 - Elektronisesti ohjattu ilmanvaihtokone maaviileäjäähdytyksellä ($P_n = 1140 \text{ W}$, puhallintehot 2 x 230 W)
 - Jääkaappipakastin mekaanisilla termostaateilla ($P_n = 160 \text{ W}$)
 - Kaappipakastin elektronisella termostaatilla ($P_n = 90 \text{ W}$)

Taajuusmuuttaja – toiminnalliset testit

- Tutkittu taajuusmuuttajakäyttö:
 - 5,5 kW taajuusmuuttaja + 2,2 kW moottori
- Testejä tehtiin:
 - Skalaarisäätömoodissa, jota käytetään yleisesti mm. pumppu- ja puhallinkäytöissä (soveltuu myös monimoottorikäyttöihin)
 - DTC(Direct torque control)-moodissa, jossa hyödynnetään vektorisäätöä
- Skalaarisäätömoodissa esiintyi lyhyillä 0,3...0,7 s jännitteettömillä ajoilla taajuusmuuttajan ohjauslogiikan jumiutumisia, jotka edellyttivät virran katkaisua ja uudelleenkytkentää.
- DTC-moodissa taajuusmuuttajan jälleenkytkentöjen sieto oli selvästi parempi.

		Pjk:n jännitteetön aika [s]						
	T_m	0.3	0.5	0.7	1.0	2.0	5.0	10.0
Skalaari- säätö- moodi, POW = 90 °	1.5	C	f-C3x	f-C3x	S+B	S+B	S+B	S+B
	5.5	f-C3x	f-C3	S+B	S+B	S+B	S+B	S+B
	11	f-C3x	f-C3	S+B	S+B	S+B	S+B	S+B
	16.5	f-C3x	S+B	S+B	S+B	S+B	S+B	S+B
	22	f-C3x	S+B	S+B	S+B	S+B	S+B	S+B
DTC- moodi, POW = 90 °	1.5	C	C	C	C	f-C3	S+B	S+B
	5.5	C	C	C	f-UV	S+B	S+B	S+B
	11	C	C	f-UV	f-C8	S+B	S+B	S+B
	16.5	C	f-UV	f-C2	f-C3	S+B	S+B	S+B
	22	C	f-UV	f-C3	S+B	S+B	S+B	S+B
C =	taajuusmuuttaja jatkoi toimintaansa							
f-UV =	moottori pysähtyi, virheilmoitus: undervoltage (3220), resetoitavissa							
f-C2 =	moottori pysähtyi, virheilmoitus: communication fault (2), resetoitavissa							
f-C3 =	moottori pysähtyi, virheilmoitus: communication fault (3), resetoitavissa							
f-C3x =	moottori pysähtyi, virheilmoitus: communication fault (3), ei resetoitavissa, vaati taajuusmuuttajan uudelleenkäynnistyksen							
f-C8 =	moottori pysähtyi, virheilmoitus: communication fault (8), resetoitavissa							
S+B =	moottori pysähtyi, taajuusmuuttaja käynnistyi uudelleen normaalitilaan							

Taajuusmuuttaja - kytkentävirtasysäykset

- Skalaarisäätöä käytettäessä lyhyillä jälleenkytkentäviiveillä esiintyi hyvin suuria kytkentävirtasysäyksiä, huippuarvo jopa 170 A
 - toiminnallisissa testeissä havaitut taajuusmuuttajan ohjauslogiikan jumiutumiset näyttivät liittyvän näihin
 - kuormittavat mm. taajuusmuuttajan tasasuuntaajaa ja voivat lyhentää laitteen elinikää
- Syy: taajuusmuuttajan DC-välipiirin kondensaattoreiden jännite ei ehdi lyhyillä jälleenkytkentäviiveillä laskea riittävän alas
 - ⇒ kondensaattoreiden latauksen hidastuspiiri ei ehdi aktivoitua, jolloin kytkentävirtaa rajoittavat lähinnä vain verkon impedanssi ja taajuusmuuttajan verkkosuodattimen impedanssit
- DTC-säädöllä suurimmat kytkentävirta-sysäysten huippuarvot olivat selvästi pienempiä (noin 100 A)
 - Tehollisarvot yleensä alle taajuusmuuttajan nimellisvirran $I_n=13,9$ A

a) Taajuusmuuttajan kytkentävirtasysäykset (huippuarvo), skalaarisäätö

		Jälleenkytkennän jännitteetön aika [s]							
		T_m	0.3	0.5	0.7	1.0	2.0	5.0	10.0
$i_{peak, max}$ [A]	1.5		118	139	165	76.9	21.5	22	72.5
	5.5		169	18	24.1	19.23	20.1	61.9	25.2
	11		163	36.5	41.6	23.5	30.4	22.4	24.2
	16.5		170	60.2	28.1	21.7	29.2	34.7	25
	22		148	44.5	18.3	17.6	20	24.6	39.7

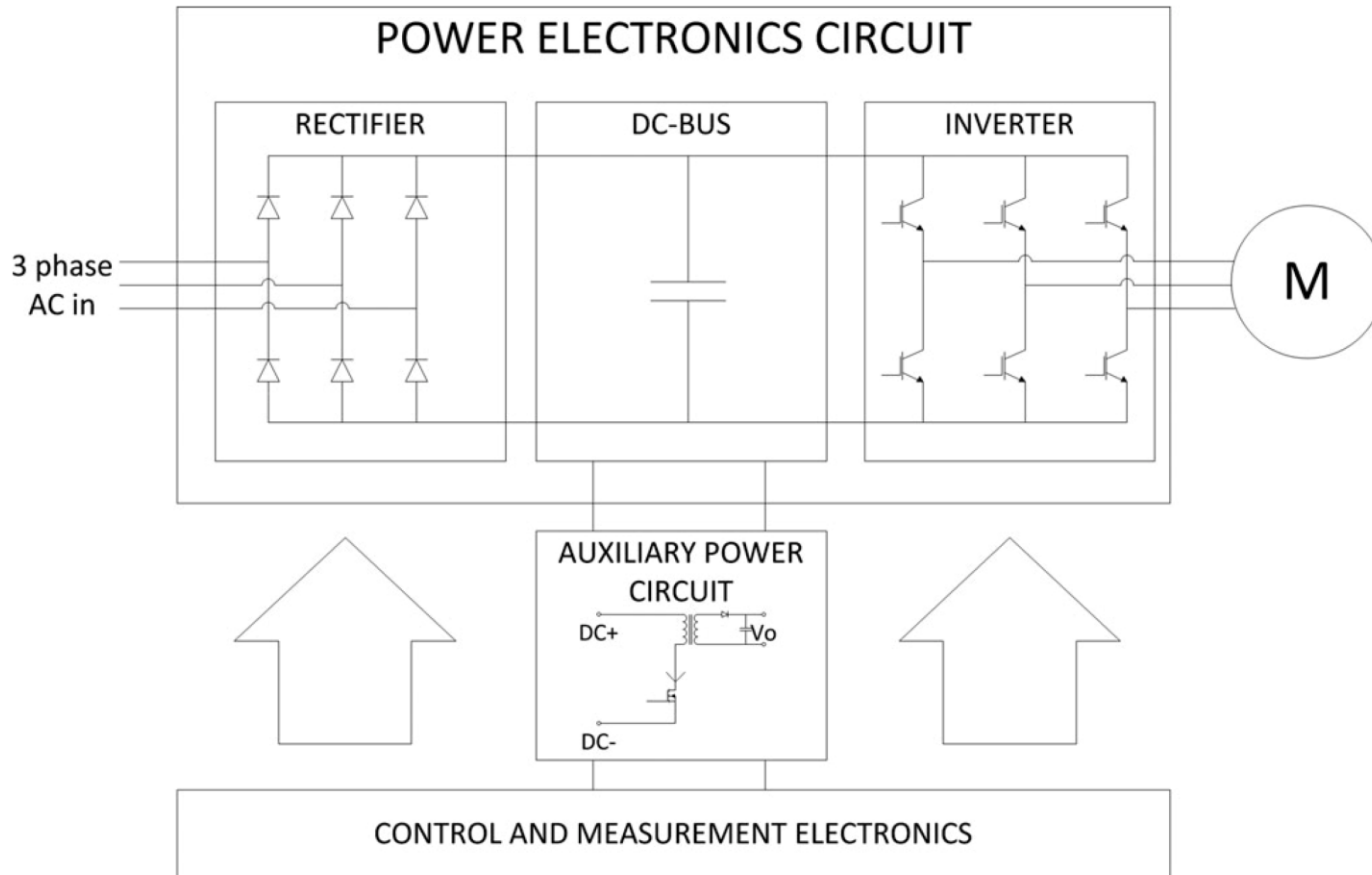
b) Taajuusmuuttajan kytkentävirtasysäykset (20 ms rms), skalaarisäätö

		Jälleenkytkennän jännitteetön aika [s]							
		T_m	0.3	0.5	0.7	1.0	2.0	5.0	10.0
$i_{rms, max}$ [A]	1.5		24	22.4	26.5	5.72	2.16	2.06	5.24
	5.5		27.4	2.26	2.62	1.96	2.41	5.09	2.25
	11		26.1	3.24	4.21	2.1	2.65	1.87	2.21
	16.5		27.6	4.36	2.13	2.17	2.62	2.96	1.95
	22		23.4	3.69	1.81	1.92	2.12	1.89	3.12

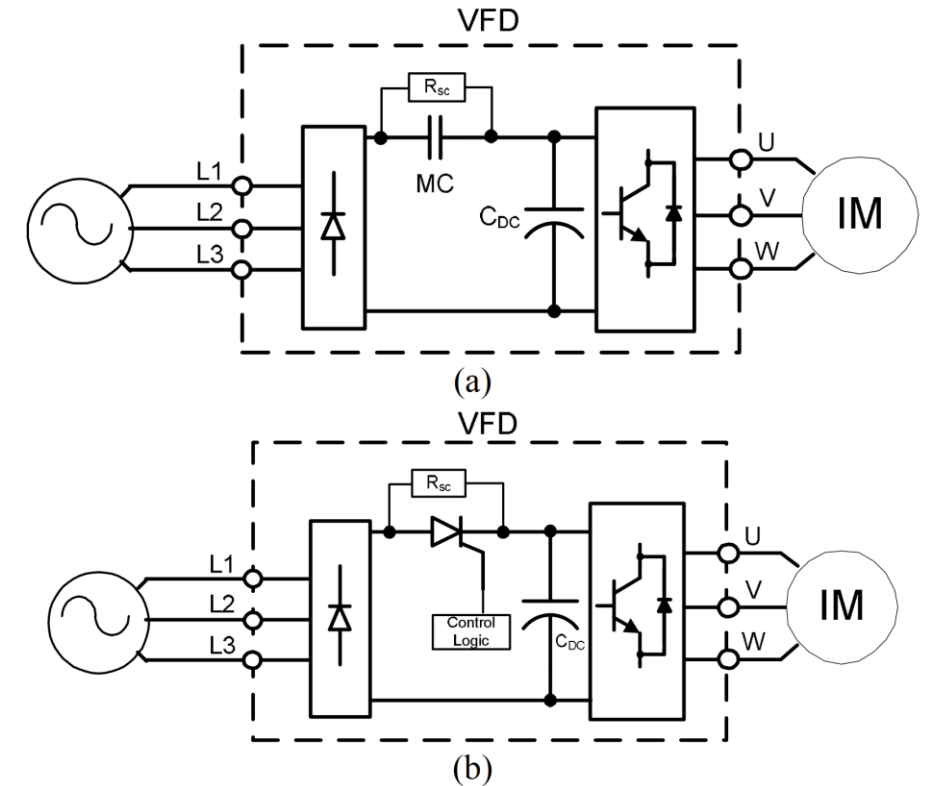
c) Taajuusmuuttajan kytkentävirtasysäykset (huippuarvo), DTC-säätö

		Jälleenkytkennän jännitteetön aika [s]							
		T_m	0.3	0.5	0.7	1.0	2.0	5.0	10.0
$i_{peak, max}$ [A]	1.5		34.5	34.6	28.7	32.1	52	21.8	29.1
	5.5		31.2	32.1	39.1	35.4	29.8	18.9	26.9
	11		69	95.3	18	35.9	24.6	26.9	31.9
	16.5		61.7	37.3	32.3	31.7	17.9	28.3	18.5
	22		104	16.63	21.3	73.1	15.8	36.5	40.9

Taajuusmuuttaja - lohkokaavio



Nimellisteholtaan muutamien kW...kymmenien kW taajuusmuuttajien tyypillinen rakenne.



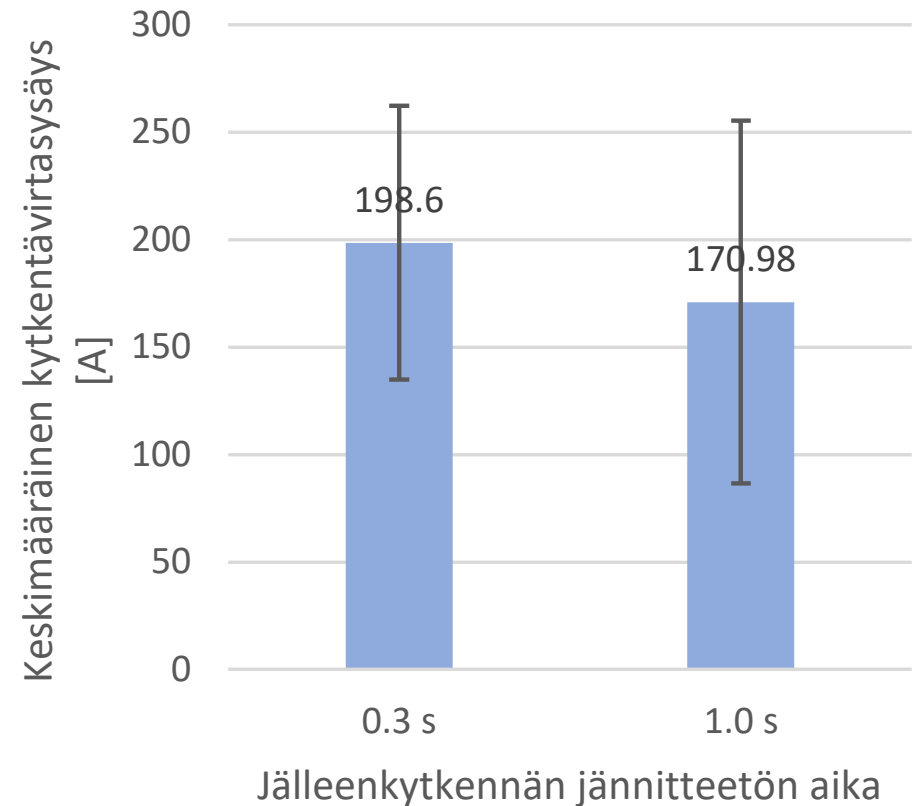
Taajuusmuuttajan DC-välipiirin kondensaattorin latauksen hidastus resistanssilla, joka ohitetaan (a) mekaanisella kontaktorilla (MC) (b) tyristorilla.

Muut laitteet

- Elektronisesti ohjattu ilmanvaihtokone ja pakastinkaappi elektronisella termostaatilla jatkoivat toimintaansa useimmissa 0,3 s jännitteettömällä ajall tehdyissä jälleenkytkennöissä.
- Pidemmillä 0.5...10 s jännitteettömillä ajoilla molemmat pysähtyivät, mutta jatkoivat toimintaansa automaattisesti jännitteen palattua, IV-kone noin 1 minuutin kuluttua ja pakastinkaappi noin 6 minuutin kuluttua.
- Mekaanisilla termostaateilla varustettu jääkaappipakastin oli ongelmallinen erityisesti 0,3...0,7 s jännitteettömillä ajoilla, jos jännitteen katkaisu- ja kytkentävaihekulma oli $POW = 0^\circ$ tai $POW = 30^\circ$.
 - Kompressori alkoi värähdellä ja pitää ääntä noin 10 s ajan, kunnes kompressorin suojaus kytki sen jännitteettömäksi noin 20...25 s ajaksi. Sykli toistui kunnes kompressori käynnistyi normaalisti (yleensä 1-2 syklin jälkeen).

Kenttämittaukset (noin 10 kk/kohde)

- Mittauskohteet (aluksi $t_d = 0,3$ s, myöhemmin $t_d = 1,0$ s):
 1. Teollisuuslaitoksen hakelämpökeskuksen syöttö
 2. Teollisuuskohteen syöttö, kohteessa mm. hitsausrobotteja
 3. Sikalan automaattisen ruokintakoneen syöttö
- Kohteessa 1 savukaasuimurin taajuusmuuttaja jumiutui yleensä jälleenkytkentöjen jälkeen niin, että uudelleenkäynnistys edellytti käyttäjän toimia (taajuusmuuttajan kytkemistä hetkeksi pois päältä).
- Myös kytkentävirtasysäykset suuria (133-340 A (peak)) ilmiö vaikutti samalta kuin laboratoriomittauksissa eri valmistajan taajuusmuuttajassa havaittu ongelma.
- Jännitteettömän ajan pidentäminen (0,3 -> 1,0 s) näytti pienentävän kytkentävirtasysäyksiä ja kohteen edustajan mukaan hakelämpökeskus on nyt jatkanut toimintaansa normaalisti jälleenkytkentöjen jälkeen.



Yhteenveto ja johtopäätökset (1)

- Tutkimuksen perusteella näyttää siltä, että yleisesti käytetyt pikajälleenkytkennän jännitteettömät ajat 0,3...0,7 s ovat liian lyhyitä monille asiakaslaitteille, erityisesti taajuusmuuttajille, varsinkin jos niitä käytetään skalaarisäätömoodissa.
- Kyselytutkimuksen perusteella ongelmia esiintyy myös esimerkiksi lämpöpumppujen ja pellettilämmitysjärjestelmien sekä teollisuuden ja maatalouden automaatiojärjestelmien toiminnassa.
- Hankkeessa tehtyjen mittausten perusteella optimaalinen jännitteetön aika olisi 2...5 sekuntia. Sähkölaitteiden EMC-testausvaatimukset puoltaisivat 5 sekunnin jännitteettömän ajan käyttöä.
- Em. jännitteettömillä ajoilla vältettäisiin esimerkiksi taajuusmuuttajien ohjauslogiikoiden jumiutuminen, jolloin ne ovat katkon jälkeen uudelleen käynnistettävissä automaation ohjaamina sen sijaan, että vaatisivat käyttäjän manuaalisia toimia. Useimmat muutkin laitteet todennäköisesti ehtivät palautua normaaliin "lepotilaan".
- Myös jälleenkytkentää oikosulkuvioissa edeltävän jännitekuopan ominaisuuksien vaikutus laitteiden jälleenkytkennän jälkeiseen toimintaan jää pidemmällä jälleenkytkennän jännitteettömillä ajoilla vähäisemmäksi.

Yhteenveto ja johtopäätökset (2)

- Jännitteettömän ajan pidentäminen 2...5 sekuntiin pienentäisi myös oleellisesti taajuusmuuttajien ja muiden samantyyppisellä verkkoliitännästekniikalla varustettujen laitteiden kytkentävirtasysäystä jännitteen palatessa. Pienempi (laitteen normaalia käynnistystä vastaava) kytkentävirtasysäys
 - kuormittaisi laitteen tasasuuntaajaa ja muita verkkoliityntäkomponentteja vähemmän ja pidentäisi niiden elinikää sekä
 - vähentäisi kytkennän aiheuttamia häiriöitä verkon jännitteissä.
- Varjopuoleksi voidaan katsoa
 - muiden kuin UPSilla tai muulla energiavarastolla varmennettujen laitteiden toiminnan pysähtyminen myös pikajälleenkytkennöissä.
 - pidempi katkos esimerkiksi valaistuksessa.

Kiitos!