



**Kostir og gallar jarðbundinna og fljótandi
dreifikerfa: Jarðhlaupsvarnir í fljótandi
dreifikerfum**

Eiríkur Sæmundsson

Lokaverkefni í rafmagnstæknifræði B.Sc.

2013

Eiríkur Sæmundsson:
Kennitala: 160884-3049
Leiðbeinandi: Ragnar Kristjánsson

Tækni- og verkfræðideild
School of Science and Engineering



Tækni- og verkfræðideild

Heiti verkefnis:

Kostir og gallar jarðbundinna og fljótandi dreifikerfa:
Jarðhlaupsvarnir í fljótandi dreifikerfum

Námsbraut:

Rafmagnstæknifræði B.Sc.

Tegund verkefnis:

Lokaverkefni í tæknifræði B.Sc.

Önn:

Haust
2013

Námskeið:

RTLOK2013

Ágrip:

Í þessu verkefni eru jarðbundin og fljótandi dreifikerfi skoðuð. Verkefnið var unnið í samstarfi við fyrirtækið Green energy group. Skoðaðar voru nokkrar aðferðir til þess að jarðbinda núllpunkta aflspenna í dreifikerfum svo sem jarðbinding í gegnum ekkert viðnám, lágt viðnám, hátt viðnám og ójarðbundið. Kostir og gallar skoðaðir og varnarbúnaður skoðaður. Áhersla var lögð á ein-fasa bilanir og varnaraðferir til það nema þær.

Markmið verkefnisins var að skoða hvort fljótandi dreifikerfi væri fýsilegur kostur og hvort hægt væri að verja þannig kerfi nægjanlega vel.

Höfundur:

Eiríkur Sæmundsson

Umsjónarkennari:

Kristinn Sigurjónsson

Leiðbeinandi:

Ragnar Kristjánsson

Fyrirtæki/stofnun:

Green energy group

Dagsetning:

09.12.2013

Lykilorð íslensk:

Fljótandi kerfi
Jarðhlaupsvörn
Núll spennufylgd

Lykilorð ensk:

Ungrounded system
Earth-fault protection
Zero sequens voltage

Dreifing:

opin

lokuð

til:

Formáli

Verkefni þetta er unnið sem lokaverkefni til B.Sc gráðu í rafmagnstæknifræði við háskólann í Reykjavík. Hugmyndin að verkefninu kom frá Stefáni Winkel Jessen og Páli Sigurjónssyni hjá Green Energy Group.

Verkefnið fjallar um kosti og galla þess að hafa dreifikerfi fljótandi eða jarðbundin og mismunandi jarðhlaupsvarnir í kerfunum. Raforkukerfi keyra oft á hárrí spennu og er því rík krafa um góðan varnarbúnað og er því mikilvægt er að varnarbúnaður passi við viðkomandi kerfi.

Höfundur vill þakka öllum sem komu að verkefninu og veittu aðstoð, Stefáni Winkel Jessen og Páli Sigurjónssyni fyrir hugmyndina að verkefninu og veitta aðstoð, Ragnari Kristjánssyni leiðbeinanda fyrir aðstoð og leiðbeiningar, Steingrími Jónssyni hjá Rarik fyrir aðstoð, Eymundi Sigurðssyni, Bernharði Ólasyni og Sveini Rúnari Júlíussyni fyrir góðan fund um efni verkefnisins og Kristni Sigurjónssyni umsjónarkennara fyrir veitta aðstoð.

Einnig vill höfundur þakka foreldrum sínum, Sæmundi Ásgeirssyni og Steinunni Jóhannsdóttur fyrir ómetanlega aðstoð meðan verkefnið var unnið. Að lokum vill höfundur þakka Alexöndru Ýrr Pálsdóttur, sambýliskonu sinni, fyrir mikinn stuðning og þolímæði á meðan verkefnið var unnið.

Eiríkur Sæmundsson

Efnisyfirlit

Myndaskrá	ii
Töfluskrá	iii
Orðskýringar	iv
Inngangur	1
1 Raforkukerfi	2
1.1 Raforkuflutningskerfi	2
1.2 Raforkudreifikerfi	3
1.3 Per unit kerfi	3
2 Bilanir í Háspennudreifkerfum	5
3 Varnarbúnaður	5
3.1 Spennu- og straumspennar	6
3.2 Varnarsvæði	9
3.3 Varnaraðferðir	9
3.4 Varnir rafala	11
3.5 Varnir aflspenna	13
3.6 Varnir háspennulína og strengja	13
4 Jarðbundin dreifikerfi	15
4.1 Jarðbindingar	15
4.2 Ein-fasa bilun	17
4.2.1 Útreikningar á ein-fasa bilun í jarðbundnu kerfi	21
4.2.2 Hermun ein-fasa bilunar í jarðbundnu kerfi	25
4.2.3 Jarðhlaupsvarnir í jarðbundnum kerfum	26
5 Fljótandi dreifikerfi	27
5.1 Ein-fasa bilun	28
5.1.1 Útreikningar á ein-fasa bilun í fljótandi kerfi	29
5.1.2 Hermun ein-fasa bilunar í Fljótandi kerfi	31

5.1.3	Prófun varnarliða	32
5.1.4	Dæmi um bilun	33
5.1.5	Jarðhlaupsvarnir í fljótandi kerfum	34
5.2	Háviðnáms jarðtenging	37
5.3	Dreifikerfi jarðbundin í gegnum Petersen spólu	37
5.3.1	Jarðhlaupsvarnir í kerfum jarðtengdum í gegnum Petersen spólu .	39
6	Niðurstöður	40
7	Heimildir	42
	Viðaukar	44

Myndaskrá

1	Raforkukerfi [1, Bls.707]	2
2	Þriggja fasa bilun [2, Bls.4]	5
3	Skammhlaup milli tveggja fasa [2, Bls.4]	5
4	Tveir fasar til jarðar [2, Bls.4]	5
5	Eins fasa bilun [2, Bls.4]	5
6	Straumspennir og Spennuspennir [3, Bls.526]	6
7	Spennumælaspennt [4, Bls.6-4]	7
8	Opin þríhyrningstenging [4, Bls.6-4]	7
9	Rásamynd af Rýmdar-spennumælaspennt [4, Bls.6-5]	8
10	Straummælaspennt [4, Bls.6-11]	8
11	Rogowski spóla [4, Bls.6-20]	9
12	Varnarsvæði raforkukerfis [3, Bls.548]	9
13	Mismunastraumsvörn [5, Bls.194]	10
14	Varnir rafala [4, Bls.17-25]	12
15	Föst jarðtenging á núllpunkti á spenni [6, Bls.6]	15
16	Lágviðnáms jarðtenging með viðnámi [6, Bls.6]	16
17	Jákvætt fylgdar kerfi [4, Bls.4-4]	17
18	Neikvætt fylgdar kerfi [4, Bls.4-4]	18
19	Núll fylgdar kerfi [4, Bls.4-4]	19
20	öll þrjú kerfin saman á einu grafi [4, Bls.4-4]	19
21	Straumfylgdar kerfin við ein-fasa bilun á fasa a [5, Bls.145]	20
22	Spennufylgdarkerfin við ein-fasa bilun á fasa a [5, Bls.145]	20
23	Kerfi sem notað var við útreikninga	21
24	Núll fylgdarkerfi	21
25	Jákvætt fylgdarkerfi	21
26	Neikvætt fylgdarkerfi	21
27	Núll fylgdarkerfi	22
28	Jákvætt fylgdarkerfi	22
29	Neikvætt fylgdarkerfi	22
30	Raðtenging kerfana	22
31	Kerfi í Power World	25

32	Rétt tenging [4, Bls.9-17]	26
33	Röng tenging [4, Bls.9-17]	26
34	Kennilínur yfirstraumsvarna með Andhverfum tíma [4, Bls.9-8]	27
35	Fljótandi raforkukerfi [6, Bls.3]	27
36	Spennu þríhyrningur fyrir fljótandi kerfi [7, Bls.2]	28
37	líkan af fljótandi raforkukerfi	29
38	Raðtenging fylgdar kerfa fyrir fjótandi kerfi	30
39	Fljótandi kerfi í Power World	31
40	Tilbúin ein-fasa bilun [8]	32
41	Fasa spennur í ein-fasa bilun [8]	33
42	I_0 og V_0 í Ein-fasa bilun [8]	33
43	núll spennufylgd [4, Bls.9-18]	34
44	Samband milli I_0 og U_0 [9, Bls.485]	36
45	Fljótandi kerfi með ein-fasa bilun á einni línu [10, Bls.98]	36
46	Hliðtenging straummælaspenna [4, 9-15]	36
47	Háviðnáms jarðtenging í gegnum spenni [5, Bls.233]	37
48	Háviðnáms jarðtenging í gegnum þrjá spenna [5, Bls.234]	37
49	Kerfi jarðtengt í gegnum Petersen spólu [6, Bls.7]	38
50	Ein-fasa bilun í Kerfi jarðtengt í gegnum Petersen spólu [6, Bls.7]	38
51	Fylgdar kerfi í Petersen spólu kerfi [6, Bls.7]	39
52	Slitrótt jarðhlaupsbilun [10, Bls.103]	39
53	Straumfylgdarkerfi með tilliti til bilana [5]	45
54	Spennufylgdarkerfi með tilliti til bilana [5]	45

Töfluskra

1	Spenna og fashorn á fösum A, B og C	25
2	Straumar á fösum A, B og C	25
3	Spenna og fashorn á fösum A, B og C í fljótandi kerfi	31
4	Straumar á fösum A, B og C í fljótandi kerfi	32

Orðskýringar

Andhverfur tími	(e. Inverse time)
Fastur tími	(e. Definite time)
Fylgdar kerfi	(e. Sequence network)
Föst jarðtenging	(e. Solid grounding)
Jafnlæg bilun	(e. Balanced fault)
Jafnlægir Þættir	(e. Symmetrical components)
Jákvætt fylgdar kerfi	(e. Positive sequence network)
Jákvæð spennufylgd	(e. Positive sequence voltage)
Jákvæð straumfylgd	(e. Positive sequence current)
Neikvætt fylgdar kerfi	(e. Negative sequence network)
Neikvæð spennufylgd	(e. Negative sequence voltage)
Neikvæð straumfylgd	(e. Negative sequence current)
Núll fylgdar kerfi	(e. Zero sequence network)
Núll spennufylgd	(e. Zero sequence voltage)
Núll straumfylgd	(e. Zero sequence current)
Slitróttar jarðhlaupsbilanir	(e. Intermittent earth faults)
Summuspenna	(e. Residual voltage)
Varnarsvæði	(e. Zones of protection)

Inngangur

Verkefni þetta felst í því að skoða fljótandi og jarðbundin raforkukerfi. Green Energy Group er að vinna verkefni í Kenýa sem felst í því að koma upp litlum gufuaflsvirkjunum í landinu. Virkjanirnar framleiða raforku á 11 kV spennu en flutningur á raforkunni er á 33 kV. Því er aflspennir sem breytir 11kV í 33kV. Aflspennarnir eru með möguleika á að jarðbinda núllpunktinn en kerfið leysti út þegar núllpunktur var jarðbundinn. Þá kom upp hugmynd um að skoða hvort fljótandi kerfi væri möguleiki við þessar aðstæður.

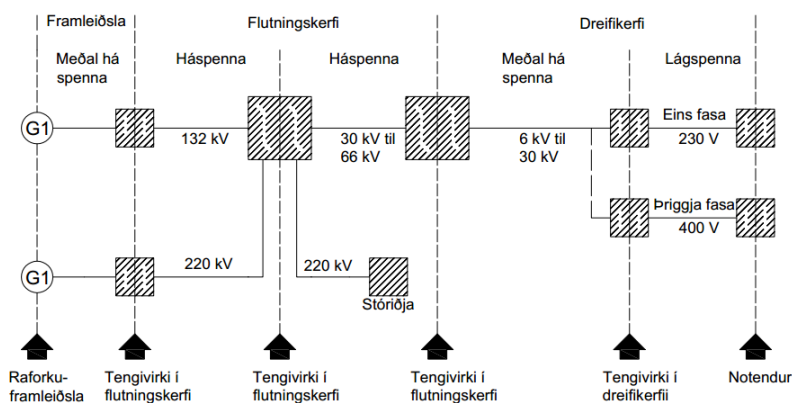
Í þessu verkefni verða kannaðir kostir og gallar þess að hafa raforkukerfi jarðbundin og fljótandi. Áhersla verður á kerfi með meðalháa spennu, 11kV og 33kV. Fjallað verður um jarðbindingar á spennum, jarðbindingar með lágu viðnámi, háu viðnámi og svo ójarðbundið. Áhersla verður lögð á að skoða eins fasa bilanir í þessum kerfum ásamt því að fara yfir varnaraðferðir fyrir eins fasa bilanir í báðum kerfum. Sérstaklega verður fjallað um jarðhlaupsvarnir í fljótandi kerfum og skoðað hvaða aðferðir eru í boði. Umfjöllunin verður almennt en ekki með sérstakt kerfi í huga þó svo hugmyndin sé tilkomin vegna ákveðins kerfis.

Í byrjun verkefnisins verður fjallað almennt um raforkukerfi, flutnings- og dreifikerfi. Einnig verður fjallað um per unit kerfið og bilanir í raforkukerfum. Almennt verður fjallað um varnarbúnað svo sem mælaspenna, varnarsvæði og varnir einstaka búnaðar. Eftir að búið er að kynna raforkukerfi og varnarkerfi almennt verður fjallað um jarðbundin og fljótandi kerfi eins og áður var lýst.

Tilgangur verkefnisins er að kanna hvort fljótandi kerfi sé fýsilegur kostur og hvort hægt sé að verja kerfið og nánasta umhverfi þess með fullnægjandi hætti svo ekki verði tjón á búnaði eða fólki stafi hætta af.

1 Raforkukerfi

Hægt er að skipta raforkukerfi í þrjá hluta: Raforkuframleiðslu, raforkuflutningskerfi og raforkudreifikerfi. Framleiðsla á raforku fer fram með ýmsum hætti, t.d. vatnsafl, jarðvarma, vindorku, kjarnorku, olíu, kolum og fleiru. Yfirleitt fer framleiðslan fram þeim þeim hætti að vatnsafl, eða annar orkugjafi, er látið snúa túrbínu sem snýr svo rafal sem framleiðir rafmagn [11]. Raforkukerfið er rekið á nokkrum spennustigum og fer það eftir því hvort um ræðir framleiðslu, flutning eða dreifingu rafmagns. Spenna á rafölum er oft 11 kV, en síðan er aflspennir sem er staðsettur nálægt rafalnum sem breytir 11 kV í 132 kV eða 220 kV fyrir raforkuflutningskerfið. Spenna á flutningskerfi getur verið frá 30 kV til 220 kV [12]. Raforkuflutningskerfið sér um að flytja raforku langar vegalengdir frá virkjunum að tengivirkjum þar sem dreifikerfi taka við. Flutningslínur tengjast við spennana í gegnum tengivirki sem eru við virkjanir. Í tengivirkjum er ýmis annar búnaður, svo sem straumspennar, spennuspennar, aflrofar og fleira. Raforkudreifikerfi tengist við flutningskerfið í tengivirkjum. Í þeim eru aflspennar sem breyta spennunni niður í 19 kV, 11 kV eða aðra spennu sem er notuð á dreifikerfinu. Í dreifikerfinu eru svo aðrir minni spennar sem breyta spennunni niður í 400 V fyrir notendur [11]. Á mynd 1 sést hvernig raforkukerfi gæti litið út.



Mynd 1: Raforkukerfi [1, Bls.707]

1.1 Raforkuflutningskerfi

Raforkuflutningskerfi eru oftast þriggja fasa kerfi því það getur flutt meira afl en ein fasa kerfi miðað við kostnað. Einnig eru þriggja fasa kerfi hagstæðari vegna þess að mótórar,

rafalar og spennar eru einfaldari, ódýrari og afkasta meira en ef þeir væru eins fasa. Raforkuflutningskerfið er sá hluti raforkukerfis sem sér um flutning á raforku frá virkjunum að tengivirkjum þar sem dreifikerfin taka við. Dæmi um raforkuflutningskerfi er byggðarlínan hér á landi. Raforkuflutningskerfi eru alltaf rekin á háspennu eða meðalhárri spennu vegna þess hve mikið afl þarf að flytja. Með því að hækka spennu rennur minni straumur og því verða minni töp. Á móti kemur að einangrun þarf að vera meiri. Raforkuflutningskerfi samanstendur af háspennulínunum, háspennustrengjum að litlu leyti, tengivirkjum og spennistöðvum [1].

1.2 Raforkudreifikerfi

Dreifikerfi eru yfirleitt á lægri spennu en flutningskerfið. Það stafar af því að dreifikerfið er nær notandanum og hver hluti kerfisins þarf að flytja minna afl og því getur það verið flutt með lægri spennu. Dreifikerfi samanstendur af háspennulínunum, háspennustrengjum, lágspennustrengjum, tengivirkjum og spennistöðvum. Háspennulínur í dreifikerfinu eru yfirleitt á 11 kV og 19 kV. Jarðstrengir eru einnig á 11 kV og 19 kV og svo eru einnig strengir á 400 V sem fara til minni notenda. Tengivirki er þar sem flutningskerfið afhendir orku til dreifikerfisins. Einnig eru tengivirki í dreifikerfinu þar sem orkunni er dreift enn frekar. Hlutir í tengivirkjum eru eftirfarandi [1]:

- Afspennar
- Eldingavarar
- Afrofar
- Launaflsbúnaður
- Skilrofar
- Mælaspennar
- jarðblöð
- Varnarbúnaður

Spennistöðvar í dreifikerfum eru af mörgum stærðum og gerðum. Spennistöð er þar sem aflspennir breytir spennu í kerfinu. Stærð á spennistöðvum fer eftir því hvar hún er í kerfinu, hvort margir notendur tengjast við hana og einnig hversu stórir notendurnir eru. Stundum er byggt yfir spennistöðvar en stundum eru spennar hannaðir til að vera úti. Spennar geta verið allt frá því að vera nokkur kVA hangandi upp í staur fyrir einn notandi og í það að vera nokkur MVA í yfirbyggingu. [1].

1.3 Per unit kerfi

Við útreikninga á háspennukerfum er oftast notast við svokallað per unit kerfi. Það virkar með þeim hætti að grunnildi fyrir spennu, straum, viðnám og afl er skilgreint og svo eru öll gildi kerfisins gefin sem hlutfall af grunnildinu. Aðalávinningur þess að notast við per unit kerfi er sá að það er unnt að einfalda verulega jafngildisrásir fyrir kerfi. Gildi í per unit kerfinu fyrir spennu, straum og viðnám breytast ekki við að færa þau frá forvafi yfir á eftirvaf á spennum. Þetta einfaldar útreikninga mikið, sérstaklega þegar kerfin eru orðin mjög stór og með mörgum spennum í kerfinu. Það er mjög einfalt að gera villur í útreikningum ef það þarf að fara í gegnum marga spenna ef ekki er notast við per-unit kerfi. Hægt er að velja að handahófi grunnildi á einum stað í kerfinu en svo eru hin grunnildin háð þeim sem voru valin. Oftast eru grunnildi fyrir fasa-núll spennu V_{baseLN} og sýndarafl S_{base} valin og svo eru hin grunnildin reiknuð með eftirfarandi jöfnum [3]:

$$P_{base1\phi} = Q_{base1\phi} = S_{base1\phi} \quad (1)$$

$$I_{base} = \frac{S_{base1\phi}}{V_{baseLN}} \quad (2)$$

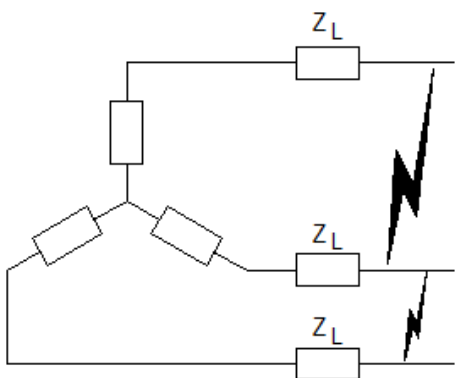
$$Z_{base} = R_{base} = X_{base} = \frac{V_{baseLN}}{I_{base}} = \frac{V_{baseLN}^2}{S_{base1\phi}} \quad (3)$$

$$Y_{base} = G_{base} = B_{base} = \frac{1}{Z_{base}} \quad (4)$$

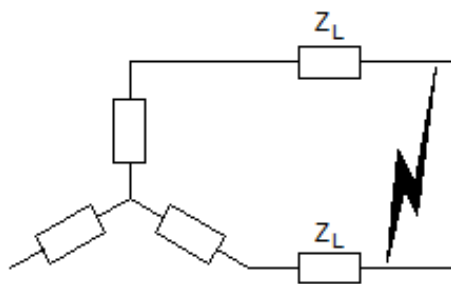
[3]

2 Bilanir í Háspennudreifkerfum

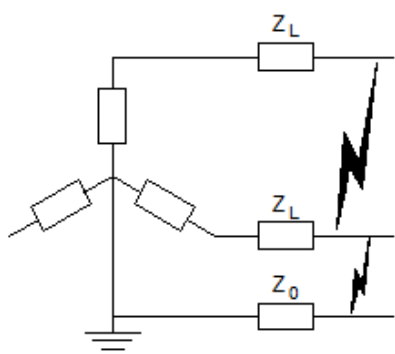
Hægt er að skipta bilunum í háspennukerfum í tvo flokka, jafnlægar bilanir og ójafnlægar bilanir. Jafnlægar bilanir geta einungis komið upp í þriggja fasa jafnlægu kerfi, þ.e. þegar jafnt álag er á öllum fösum í kerfinu. Í raunverulegum kerfum gerist þetta aldrei þar sem fasar eru alltaf eitthvað mislestaðir, þannig að þetta eru einungis fræðilegt hugtak. Þegar háspennukerfi er hannað er þetta tilvik skoðað því við þriggja-fasa jafnlæga bilun fæst mesta skammhlaupsafið og því þarf að hanna kerfið með tilliti til þess. Aðrar gerðir bilana í háspennukerfum eru fasi til jarðar bilun, fasi í fasa bilun og tveir fasar til jarðar bilun. Ójafnlægar bilanir eru mun flóknari við útreikninga. Þá er hægt að skipta þeim upp í nokkrar jafnlægar bilanir. Það er gert með því að nota aðferð jafnlægra þátta (e. symmetrical components). Á myndum 2 til 5 sjást nokkrar gerðir af bilunum í þriggja fasa kerfum [3].



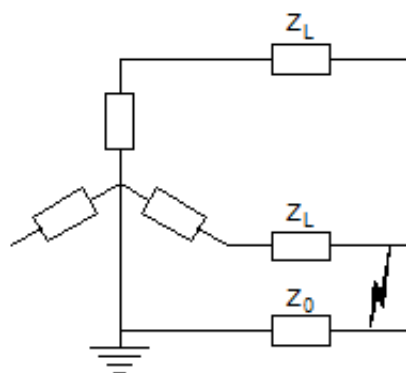
Mynd 2: Þriggja fasa bilun [2, Bls.4]



Mynd 3: Skammhlaup milli tveggja fasa [2, Bls.4]



Mynd 4: Tveir fasar til jarðar [2, Bls.4]



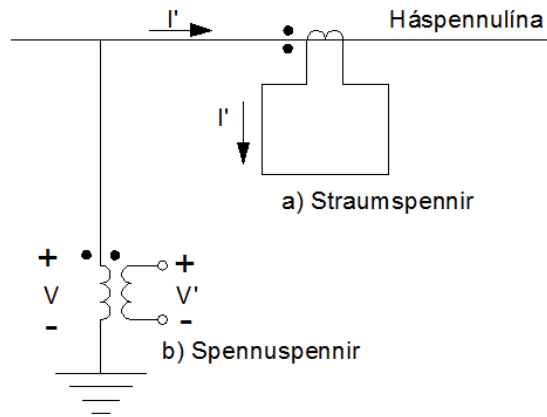
Mynd 5: Eins fasa bilun [2, Bls.4]

3 Varnarbúnaður

Tilgangur raforkukerfis er að framleiða, flytja og afhenda raforku til notenda. Orkufrekur iðnaður, heimili og aðrir notendur verða sífellt háðari raforku, þar má helst nefna álver sem geta ekki verið án raforku í marga klukkutíma án þess að stórtjón verði. Því þarf raforkukerfi að vera hannað með þeim hætti að það sé stöðugt og hagkvæmt. Mikið af búnaði raforkukerfis er mjög dýr og því geta bilanir í kerfinu orðið afar dýrar. Einnig geta bilanir mögulega valdið skaða á fólki. Bilanir sem geta komið upp eru t.d. skammhlaup milli fasa í línu, jarðhlaupsbilanir, bilanir í spennum o.fl. Mikilvægt er ef bilun verður í kerfinu að hún sé einangruð á sem stystum tíma til að lágmarka tjónið af völdum bilunarinnar. Til þess að það sé hægt þarf að vera með varnir á kerfinu. Þrjár meginþættir varnarkerfisins eru mælaspennar, varnarliðar og rofar. Í næstu köflum verður fjallað nánar um þessa þætti [4].

3.1 Spennu- og straumspennar

Spenna á dreifikerfum og flutningskerfum er yfirleitt mjög há, frá 400 V til 220 kV. Þar sem spennan er svona há er ekki hægt að tengja búnað varnarkerfis beint við kerfið. Þess vegna eru notaðir mælaspennar þ.e. spennumælaspennar og straummælaspennar. Þeir eru notaðir til að ná gildum á straum og spennu á viðráðanlegu formi svo hægt sé að fylgjast með kerfinu. Einnig er þetta gert til þess að einangra viðkvæman mælabúnað frá háspennukerfinu. Spennumælaspennar eru tengdir kerfinu með þeim hætti að forvafið er annars vegar tengt við línuna sem á að mæla og hins vegar til jarðar. Eftirvafið er svo tengt við búnað til að vinna úr mælingunum. Straummælaspennar eru hins vegar tengdir með þeim hætti að forvafið er í seríu við línuna sem á að mæla og svo er eftirvafið tengt við búnað til að vinna úr mælingunum. Á mynd 6 sést hvernig straum- og spennuspennar eru tengdir við háspennulínu [4].



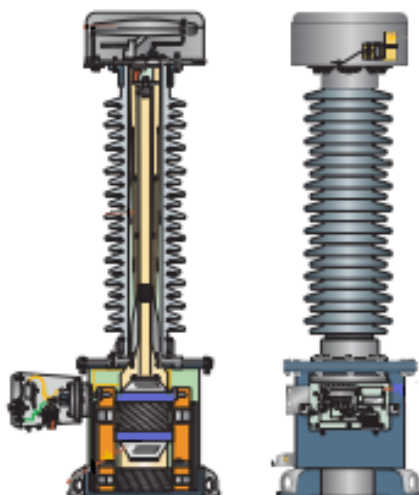
Mynd 6: Straumspennir og Spennuspennir [3, Bls.526]

Spennumælaspennum er hægt að skipta upp í tvo flokka, span-spennumælaspenna og rýmdar-spennumælaspenna. Span-spennumælaspenna er hægt að nota þegar spennan er ekki mjög há eða upp að 66 kV. Þegar spennan er orðin hærri er umfang og kostnaður á spennunum orðinn mikill og er þá notast við rýmdar-spennumælaspenna [1].

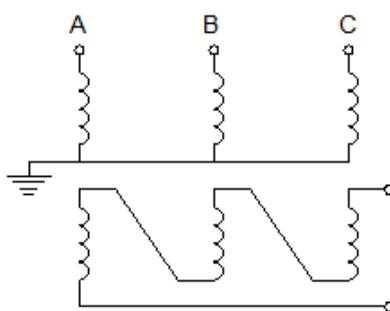
Span-spennumælaspennar eru svipað uppbyggðir og litlir aflspennar. Annar hluti forvafsins er tengdur við háspennulínu sem á að mæla en hinn hluti forvafs er tengdur til jarðar. Með þeim hætti er fasa-jörð spennukerfisins mæld. Þetta gerir að verkum að einungis þarf eina háspennutengingu á spenninum en það getur sparað mikið þegar spennan er há. Til að ná sem nákvæmustum mælingum þarf spennan á eftirvafi að vera nákvæm eftirmynd af spennunni á forvafi, einungis sköluð niður. Hlutfallið þarf að vera fasti sem breytist ekki við aukið álag. Spennan á eftirvafi þarf að vera í fasa við spennuna á forvafi. Þetta er gert með því að hafa spennufall í vindingum eins lítið og hægt er og segulstyrkurur í kjarna er hafður vel undir mettun í kjarnanum. Þessar kröfur gera að verkum að span-spennumælaspennar eru stærrí um sig en aflspennar af sömu stærð. Venjulega eru span-spennumælaspennar um eða undir 500 VA á stærð [1].

Eftirvöf á span-spennumælaspennum geta verið fleiri en eitt en það er gert til þess að hægt sé að mæla fleira en eitt í einu. Oft koma span-spennumælaspennar með eftirvaf sem er tengt í stjörnu og svo annað eftirvaf sem er tengt í opna þríhyrningstengingu. Þegar eftirvafið er tengt í stjörnu er það notað til þess að mæla fasa-fasa spennu og fasa-jörð spennu. Opna þríhyrningstengingin er notuð til þess að mæla summuspennu sem í þriggja fasa jafnlægu kerfi er 0 V. Ef jarðhlaupsbilun verður á einum fasa hækkar summuspennan verulega [4]. Á mynd 7 sést span-spennumælaspennir og á mynd 8 sést opin

þríhyrningstenging á spennumælaspennum.

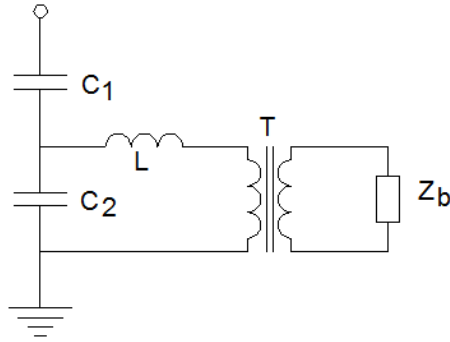


Mynd 7: Spennumælaspennir [4, Bls.6-4]



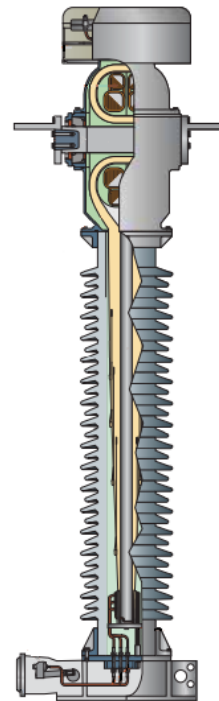
Mynd 8: Opin þríhyrningstenging [4, Bls.6-4]

Þegar spenna í háspennukerfum er höfð mjög há verður stærðin á span-spennumælaspennum mjög mikil. Stærðin stækkar ekki í réttu hlutfalli við hækkingu spennu heldur stækka þeir enn meir og verða því fljótt mjög dýrir. Þá er hagkvæmt að notast við rýmdar-spennumælaspenna. Þeir notast við spennudeilingu með þéttum sem virkar eins og spennudeiling með viðnámum. Þar sem það er rýmdarviðnám í þéttum er hægt að bæta það upp með því að raðtengja spólu við útganginn á spenninum. Í spólu er alltaf eitthvert raunviðnám sem takmarkar spennuna sem er hægt að fá á útganginn. Yfirleitt er 110 V á eftirvafi á spennumælum, til þess að ná því þyrfti spólan að vera mjög stór til þess að nothæf spenna kæmi á útganginn á spenninum. Í staðinn fyrir að hafa spóluna stóra er spennan höfð há og notast við span-spennumælaspenna til að spenna niður í 110 V. Á mynd 9 sést rásamynd af rýmdar-spennumælaspenni með spólu og span-spennumælaspenni [4].



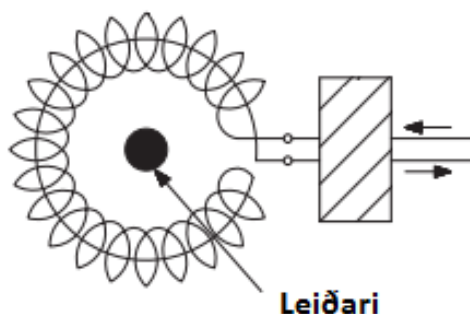
Mynd 9: Rásamynd af Rýmdar-spennumælaspenni [4, Bls.6-5]

Straummælaspennar eru uppbyggðir með þeim hætti að forvafið er raðtengt við línuna sem á að mæla. Einnig getur forvafið verið línan sjálf og þá kemur spennirinn utan um línuna. Straummælaspennar eru mjög nákvæmir því hlutfallið í þeim er fasti og breytist ekki við breytilegt álag. Einnig er fasa-hornið milli forvafs og eftirvafs mjög lítið eða mun minna en ein gráða. Þessi gæði eru fengin með því að halda straum á eftirvafi lágum. Vanalega er málstraumur á eftirvafi straummælaspennis 5 A óháð hvaða straumur er á kerfinu sem hann er notaður í. Þar sem straummælaspennar eru einungis notaðir til mælinga eru þeir frekar litlir eða 15 – 200 VA. Þegar straumur er mældur í háspennukerfum er alltaf notast við straummælaspenna. Einangrun á milli forvafs og eftirvafs þarf að vera nægileg til þess að þola fasa-jörð spennukerfisins sem hún er notuð í. Eins og fyrir spennumælaspenna er bakvaf alltaf jarðtengt. Á mynd 10 sést hvernig straummælaspennar eru uppbyggðir [1].



Mynd 10: Straummælaspennir [4, Bls.6-11]

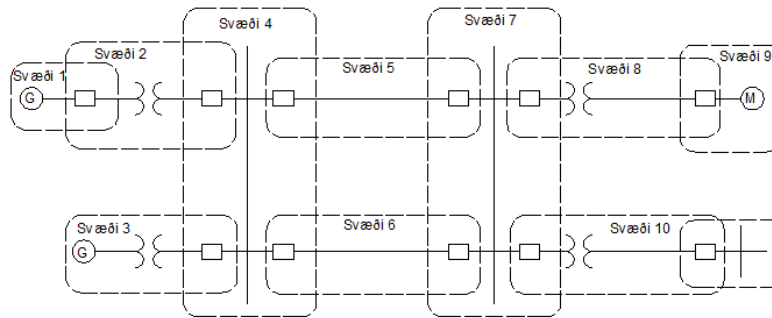
Önnur gerð af straummælaspennum er Rogowski spóla. Hún lýsir sér með þeim hætti að vír er tekinn nánast heilan hring og svo er hann vafinn í hringi til baka utan um einangrandi efni. Yfirleitt er spólan tengd við magnara til þess að geta afhent nægilegt afl til mælibúnaðar. Spólan er höfð utan um leiðarann sem á að mæla straum í. Rogowski spóla er frekar lítil og getur verið staðsett í aflrofum [4]. Á mynd 11 sést Rogowski spóla.



Mynd 11: Rogowski spóla [4, Bls.6-20]

3.2 Varnarsvæði

Þegar bilanir verða í raforkukerfum finna varnir bilunina og aflrofar slá út. Til þess að sem minnst af kerfinu fari út við bilunina er kerfinu skipt upp í svæði. Ef bilun verður á skilgreindu svæði slær það svæði út og það einangrað frá kerfinu. Svæði eru skilgreind fyrir rafala, spenna, teina, flutningslínur, dreifilínur og álag. Það geta verið fleiri en einn búnaður á hverju svæði svo sem rafali og spennir eða spennir og flutningslína. Til þess að enginn hlutur kerfisins sé óvarinn eru svæðin látin skarast. Þegar þarf að einangra svæði er það gert með aflrofum en þeir eru staðsettir þar sem svæðin skarast þ.e. aflrofar tilheyra báðum svæðum sem liggja að þeim. Þegar bilun verður á svæði opnast allir aflrofar á því svæði til að einangra það. Ef bilun verður þar sem svæðin skarast opnast allir aflrofar á báðum svæðunum. Til þess að láta svæðin skarast eru tvö sett af mælaspennum fyrir hvern aflrofa. Mælaspennarnir eru á sitthvoru svæðinu. Á mynd 12 sést hvernig raforkukerfi er skipt upp í varnarsvæði [3].

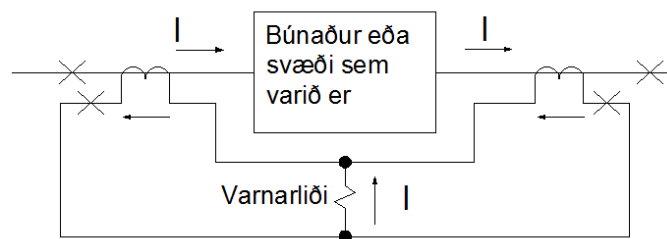


Mynd 12: Varnarsvæði raforkukerfis [3, Bls.548]

3.3 Varnaraðferðir

Til eru nokkrar aðferðir til þess að verja raforkukerfi, svo sem mismunastraumsvarnir, yfirstraumsvarnir, fjarlægðarvarnir og fleiri. Í þessum kafla verður fjallað um nokkrar þessara aðferða.

Mismunastraumsvörn virkar með þeim hætti að straumur sem rennur inn í ákveðinn punkt/svæði er mældur og svo er mældur straumurinn sem rennur útúr punktinum/svæðinu. Ef hann er ekki sá sami fyrir utan töp á svæðinu og mismun á straummælaspennum sendir vörnin merki til aflrofa sem slær út. Einfalt er að nota mismunastraumsvarnir fyrir rafala, teina, spenna og mótora því varnarsvæðin fyrir þá eru lítil og stuttar vegalengdir til þess að tengja saman straummælaspennana. Til þess að verja línur þarf að hafa millisamband á milli svæða. Á mynd 13 sést mismunastraumsvörn [5].



Mynd 13: Mismunastraumsvörn [5, Bls.194]

Þegar mismunavarnir eru ekki notaðar eru yfirstraumsvarnir eða fjarlægðarvarnir helst notaðar. Yfirstraumsvarnir eru notaðar á öllum spennustigum sem vinnur á straumnum í kerfinu. Fjarlægðarvarnir vinna með samband á milli straums og spennu með tilliti til samviðnáms í kerfinu. Yfirstraumsvarnir geta verið með föstum tíma eða andhverfum tíma. Þegar notast er við yfirstraumsvarnir eða fjarlægðarvarnir og bilun verður á jöðrum

varnarsvæðis eru þær varnir ekki jafn nákvæmar eins og ef notast er við mismunstraumsvarnir. Varnir ná ekki að greina hvort bilunin sé innan svæðisins eða utan og þar af leiðandi hvort þær eiga að vinna strax eða með seinkun í tíma. Hægt er að leysa þetta með tvennum hætti, með tíma eða samskiptum. Með tíma er átt við að sumum liðum er seinkað og einnig er hægt að notast við andhverfan tíma. Það virkar með þeim hætti að tímatöfin eykst eftir því sem straumurinn minnkar. Hin aðferðin er í rauninni eins og mismunavörn því þá eru samskipti milli liða. Notast er við stefnu á aflflæði eða fasahorn til þess að ákvarða hvort bilunin sé utan svæðis eða innan þess [5].

Hitayfirálagsvarnir eru nauðsynlegar þar sem kerfi eru keyrð nálægt hitaflutningsmörkum. Hitayfirálag er stundum ekki varið nema að hafa séstaka vörn sem vinnur bara með það. Með því að fylgjast sérstaklega með hitayfirálagi er hægt að keyra kerfið nær mörkum þess. Vörnin byrjar að gefa frá sér viðvörn svo hægt sé að bregðast við áður en línur fer út. Línur og strengir í raforkukerfum eru gerð fyrir ákveðið álag og ef farið er yfir það aukast töpin og búnaður getur orðið fyrir skemmdum. Vörnin vinnur með líkan af línunni eða strengnum og metur hitann á línunni/strengnum reglulega með því að nota mælingar á straum [10].

Neikvæð straumfylgdarvörn er notuð til þess að auka nákvæmni yfirstraumsvarna. Þar sem neikvæð straumfylgd er ekki til staðar í venjulegu jafnlægu kerfi verður vörnin nákvæmari en venjuleg yfirstraumsvörn því einungis er mæld neikvæð straumfylgd og því hægt að stilla varnir nákvæmar. Neikvæð straumfylgdarvörn getur líka verið vörn fyrir ein-fasa bilun í kerfum sem eru jarðtengd í gegnum ekkert eða lítið viðnám [10].

Nýleg dreifikerfi eru meira og minna hringtengd og orka keyrð inn á þau á mörgum stöðum því krafa um áreiðanleika hefur aukist mikið. Ein-fasa bilanir í kerfum sem jarðtengd eru í gegnum ekkert eða lágt viðnám geta valdið mjög háum bilanastraum, því þurfa varnir fyrir slíkar bilanir að vera afar góðar. Stefnuvirkar jarðhlaupsvarnir eru notaðar til að verja kerfi af þessari gerð. Annað hvort er notast við neikvæðan straum og spennufylgd eða núll strauma og spennufylgd og fer það eftir því hvernig kerfið er uppbyggt hvort er notað. Einnig eru sumir liðar sem velja sjálfir hvað hentar í hvert skipti [6]. Betur verður fjallað um jarðhlaupsvarnir fyrir ein-fasa bilanir í köflum 5.2.1 og 6.1.1.

3.4 Varnir rafala

Litlir og meðalstórir rafalar geta verið tengdir beint við flutnings- eða dreifikerfið en þegar rafalar eru orðnir stærri eru þeir tengdir við spennu og svo við flutnings- eða dreifikerfið. Rofabúnaður getur verið hafður á milli rafala og spennis. Þegar rafall er í gangi eru miklir kraftar í gangi. Því er mjög mikilvægt að grípa inn í ef bilun kemur upp. Bilanir sem geta komið upp í rafal sjást á lista hér fyrir neðan [4].

- Rafmagns bilun í sátri(stator)
- Samfösun dettur út
- Yfirlestun
- Bilun í túrbínu
- Yfirspenna
- yfirhraði
- Ójafnvæg lestun
- Bilun í oliusmurningu
- Yfir segulmögnun
- Skæling í rótor
- Spennusetning frá neti
- Mikill titringur
- Rafmagnsbilun í rótor
- Einangrunar bilun
- Segulmögnun dettur út
- Mismunur á útpenslu í hreyfihlutum og hlutum sem er fastir

Til þess að verja stator vindinga er notast við hraðvirka mismunastraumsvörn. Misjafnt er hvernig núllpunktur á rafölum er jarðtengdur, hvort hann er tengdur beint, tengdur í gegnum lágt viðnám eða hátt viðnám og fer val á vörnum eftir því [4].

Yfirspennuvörn er notuð vegna hugsanlegrar yfirspennu [4].

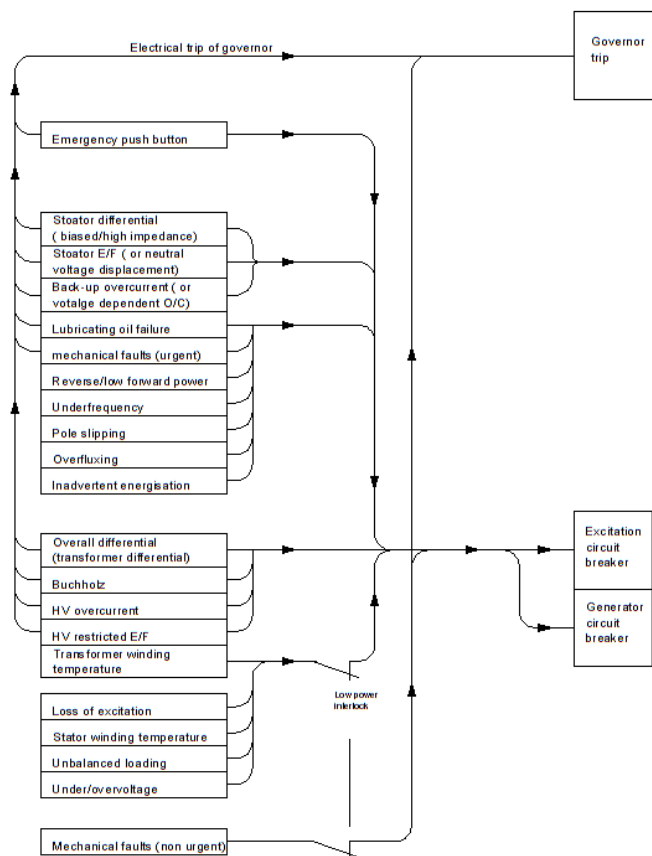
Þegar ójafnlæg lestun verður eykst neikvæð straumfylgd í kerfinu. Neikvæð straumfylgd hefur þau áhrif á rótorinn að hann hitnar mikið og það þarf að koma í veg fyrir það. Varnir geta reiknað út þennan straum og brugðist við ef þarf [4].

Til þess að verjast yfirsegulmögnun þarf að vera yfirsegulmögnunaryörn og er brugðist við með þeim hætti að segulmögnunin er minnkuð strax frá segulmögnunarrafala eða þaðan sem hún er fengin. Ef rafallinn er spennusettur til baka frá háspennukerfi getur það valdið verulegum skemmdum á honum. Til þess að verjast því er notast við samsetningu á undirspennu og yfirstraumsvörnum [4].

Til þess að finna aðrar bilanir eru alls konar skynjarar á rafölum. Þar má nefna titringsskynjara, hraðaskynjara, hitaskynjara bæði í vindingum, legum, kælivatni og í olíu.

Skynjarar eru svo tengdir varnarkerfi sem sér svo um aðgerðir ef eitthvað er óeðlilegt [4].

Á mynd 14 sjást varnir rafala.



Mynd 14: Varnir rafala [4, Bls.17-25]

3.5 Varnir aflspenna

Aflspennar í raforkukerfum geta verið af ýmsum stærðum. Frá nokkrum KVA upp í nokkur hundruð MVA. Litlir spennar eru notaðir þegar spennar eru settir upp fyrir aðeins einn notanda. Þeir spennar eru varðir með öryggjum sem eru sett fyrir framan spennana. Öryggi eru sein að vinna nema þegar straumurinn er mörgum sinnum hærra en málstraumur öryggisins og því virka þau ekki þegar um stærri spenna er að ræða, þá er notast við liðavarnir. Helstu bilanir sem geta komið upp í spennum eru eftirfarandi [4]:

- Skammhlaup í vindingum og tengingum
- Bilun í kjarna
- Leki á tanki
- Bilun í tappastilli
- Bilun í kerfi sem spennir er tengdur við

Oftast verða bilanir í vindingum og tengingum vegna einangrunarbilunar. Einangrunarbilun getur orðið vegna lélegrar hönnunar, yfirspennu, mengaðrar olú og fleira. Varnir sem eru tengdar við spenni eru yfirstraumvörn, mismunastraumsvörn, yfirsegulmögnun-
arvörn, hitamælar í vindingum og olú og buchholz-liði sem skynjar gasmyndun í spenninum [4].

3.6 Varnir háspennulína og strengja

Háspennulínur og strengir geta annað hvort tilheyrt flutningskerfinu eða dreifikerfinu. Hvort sem er þarf að verja línur og strengi fyrir bilunum. Í dreifikerfinu þar sem spennan er orðin lægri og línur eða strengurinn er ekki að flytja mikið afl eru línur og strengir varðir með öryggjum, t.d. þegar ein-fasa lína er tekin út úr þriggja fasa línu er hún varin með öryggi sem er staðsett uppi í staur í búnaði sem kallast varhalda. Einnig þegar horft er á 400 V kerfið eru strengir varðir með bræðivörum sem staðsettir eru í götukössum. Þegar bilanir verða á þessum stöðum fara öryggin út en bilanirnar hafa ekki áhrif á stærri línur í dreifikerfinu eða flutningskerfið. Öryggi eru lengur að vinna en liðavarnir. Því eru liðavarnir notaðar á stærri línur og strengjum í dreifikerfinu og flutningskerfinu því þegar spennan er mjög há og aflið mikið skiptir miklu máli að varnir séu mjög snöggar að vinna

Þannig aflrofar slái út báðu megin við bilunina og þannig einangra bilunina frá kerfinu. Varnaraðferðir sem notaðar eru til að verja háspennulínur og strengi eru eftirfarandi [5]:

- Óstefnuvirk tafarlaus yfirstraumsvörn
- Óstefnuvirk yfirstraumsvörn með andhverfum tíma
- Óstefnuvirk yfirstraumsvörn með ákveðnum tíma
- Mismunastraumsvörn
- Stefnuvirk fjarlægðarvörn
- stefnuvirk yfirstraumsvörn með andhverfum tíma
- stefnuvirk yfirstraumsvörn með ákveðnum tíma
- stefnuvirk tafarlaus yfirstraumsvörn
- Millisamband milli tengipunkta

Þessar varnaraðferðir er hægt að nota sjálfstæðar eða með hver annarri bæði gegn fasabilunum og jarðbilunum. Millisamband milli tengipunkta er þegar það þarf að fá upplýsingar um stöðu á öðrum stöðum svo vörn geti unnið og hvort hún á að vinna strax eða með tímaseinkun ef það er einhver önnur vörn annars staðar sem á að vinna fyrst [5].

4 Jarðbundin dreifikerfi

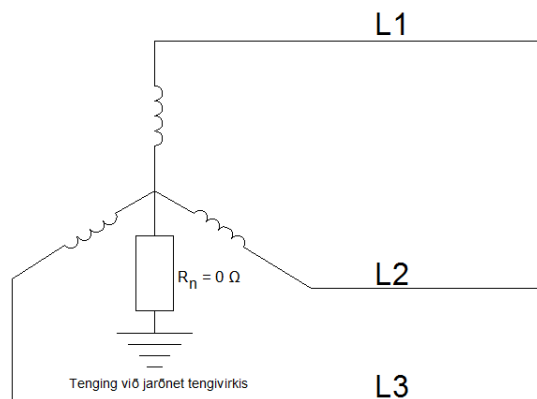
4.1 Jarðbindingar

Í jarðbundnum kerfum eru tvær leiðir til þess að jarðbinda. Föst jarðtenging og lágviðnáms jarðtenging. Einnig er til háviðnáms jarðtenging en eiginleikar hennar eru svipaðir og í ójarðbundnu kerfi og því verður fjallað um það í þeim kafla síðar í umfjölluninni. Föst jarðtenging er þegar það er nánast ekkert viðnám milli núllpunkts í spennni og jarðar. Þegar kerfi er fast jarðbundið eru allir núllpunktar í kerfinu jarðbundnir. Til þess að jarðtenging geti flokkast sem föst tenging þarf hlutfall á milli launviðnáms í jarðtengingu (x_0) og launviðnáms í kerfinu (x_1) að vera jafnt eða minna en 3% og hlutfall milli raunviðnáms í jarðtengingu (R_0) og launviðnáms í kerfinu (x_1) jafnt eða minna en 1%. Þetta sést einnig á jöfnunum hér fyrir neðan [5].

$$\frac{X_0}{X_1} \leq 3\% \quad (5)$$

$$\frac{R_0}{X_1} \leq 1\% \quad (6)$$

Þessu er náð með því að tengja núllpunkt á spennni við jarðtengingnet sem er undir tengivirkjum. Þegar kerfi eru jarðtengd með þessari aðferð getur bilunarstraumur vegna einfasa bilunar orðið allt frá því að vera frekar lítill í að vera mjög mikill og jafnvel meiri en bilanastraumur vegna þriggja-fasa bilunar. Stærð bilanastraumsins fer eftir því hvernig kerfi er byggt upp, föstum í kerfinu, staðsetningu bilunarinnar og viðnáminu í biluninni. Þar sem stærð á bilunarstraumnum fer eftir þessum þáttum er auðvelt fyrir varnarliða að staðsetja bilunina og einangra hana frá kerfinu [5]. Á mynd 15 sést hvernig núllpunktur á stjörnutengdum spennni er jarðbundinn.

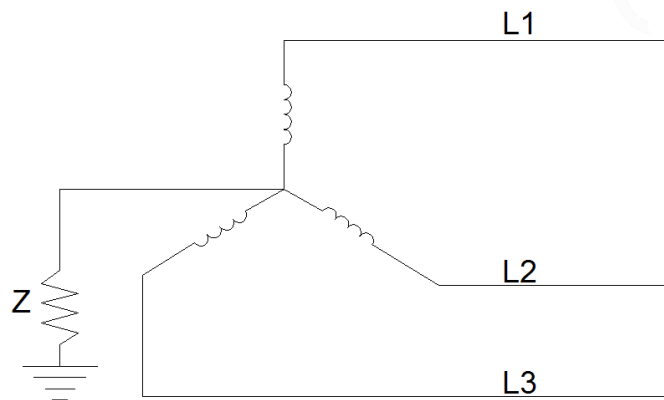


Mynd 15: Föst jarðtenging á núllpunkti á spennu [6, Bls.6]

Jarðbinding með lágu viðnámi lýsir sér með þeim hætti að núllpunktar í kerfinu eru jarðbundnir í gegnum lágt viðnám. Það er gert til þess að halda bilanastraum vegna ein-fasa bilunar niðri. Straumnum er þá haldið á bilinu 50 - 600 A. Bæði með því að jarðbinda í gegnum viðnám og með því að hafa ekkert viðnám fæst sá ávinningur að við jarðhlaupsbilun hækkar spennan ekki á fösunum sem urðu ekki fyrir bilun. Það þýðir að einangrun sem er höfð milli fasa og jarðar dugar og ekki þarf að gera sérstakar ráðstafanir vegna þess. Ef kerfið er hannað fyrir 33 kV þarf einangrun frá fasa til jarðar að vera hönnuð til að þola [5]:

$$\frac{33kV}{\sqrt{3}} \times 1.1 = 20.9kV \quad (7)$$

Þegar nafnspenna kerfis er 33 kv spennu má reka það með 10% hærri spennu en gefið er upp en gert er ráð fyrir því í jöfnunni hér fyrir ofan. Það er kostur að spennan hækki ekki við bilunina því það er kostnaðarsamt að byggja línur fyrir hærri spennu en reka á hana með. Þessi tenging er gerð með því að tengja viðnám með litlu viðnámi við núllpunkt á spennum í kerfinu. Ef ekki er möguleiki á að tengja við núllpunkta í kerfinu þ.e.a.s ef þeir eru ekki til staðar er hægt að setja stjörnu-þríhyrningstengdan spennu í kerfið með hlutfallinu 1:1 eingöngu til þess að jarðbinda núllpunktinn í stjórnutengingunni. Á mynd 16 sést jarðtenging núllpunkta í stjórnutengdum spennum í gegnum viðnám [5].



Mynd 16: Lágviðnáms jarðtenging með viðnámi [6, Bls.6]

4.2 Ein-fasa bilun

Eins og áður hefur komið fram er ein-fasa bilun ójafnlæg bilun. Til þess að skoða slíkar bilanir er þeim skipt upp í þrjár jafnlægar bilanir með aðferð jafnlægra þátta. Þá er kerfinu skipt upp í þrjú kerfi: Jákvætt fylgdarkerfi, neikvætt fylgdarkerfi og núll fylgdarkerfi. Jákvætt fylgdarkerfi samanstendur af jafnvægum þriggja fasa straum og fasa núll spennu. Allir fasar eru jafnir að stærð og er fasahornið á milli þeirra 120° . Fasaröðin er rangsælis ef horft er á fasagraf af jákvæðu fylgdarkerfi, þá er átt við hvenær hver fasi er í toppi. Fasarnir eru alltaf sett af þremur og geta ekki verið einir eða í pörum. Ef kerfið er fullkomlega jafnlægt samanstendur kerfið einungis af jákvæðu fylgdarkerfi. Á jöfnunum hér að neðan sést hvernig snúningurinn verður. Fastinn a táknar snúninginn. Einnig sjást tengslin á milli fasana. Á mynd 17 þar fyrir neðan sést svo fasagraf af jákvæðu fylgdarkerfi [5].

$$a = 1 \angle 120^\circ = -0.5 + j0.866 \quad (8)$$

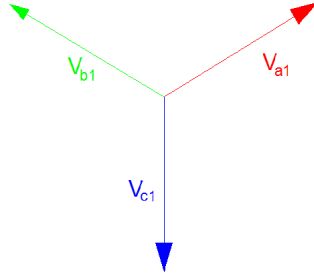
$$a^2 = 1 \angle 240^\circ = -0.5 - j0.866 \quad (9)$$

$$a^3 = 1 \angle 360^\circ = 1.0 + j0 \quad (10)$$

$$I_{a1} = I_1 \quad V_{a1} = V_1 \quad (11)$$

$$I_{b1} = a^2 I_{a1} = a^2 I_1 = I_1 \angle 240^\circ \quad V_{b1} = a^2 V_1 = V_1 \angle 240^\circ \quad (12)$$

$$I_{c1} = a I_{a1} = a I_1 = I_1 \angle 120^\circ \quad V_{c1} = a V_1 = V_1 \angle 120^\circ \quad (13)$$



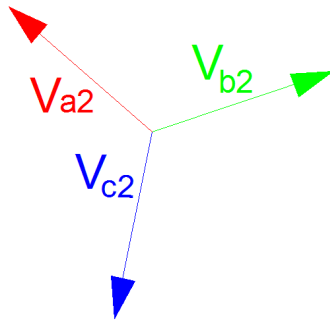
Mynd 17: Jákvætt fylgdar kerfi [4, Bls.4-4]

Þegar kerfi er jafnlægt er einungis um að ræða jákvætt fylgdarkerfi. Neikvætt fylgdarkerfi getur því eingöngu verið þegar ójafnlæg bilun á sér stað. Neikvætt fylgdarkerfi er einnig jafnlægt með jafnstórum straumum og einnig er fasahornið 120° . Fasaröðin er ekki eins og í jákvæðu fylgdarkerfi. Ef jákvæða fylgdarkerfið hefur fasaröðina a,c,b þá er fasaröðin í neikvæða fylgdarkerfinu a,b,c. Á jöfnunum hér fyrir neðan sést hvernig fasarnir eru. Á mynd 18 sést fasagraf af neikvæða fylgdarkerfi [5].

$$I_{a2} = I_2 \quad V_{a2} = V_2 \quad (14)$$

$$I_{b2} = a I_{a2} = a I_2 = I_2 \angle 120^\circ \quad V_{b2} = a V_2 = V_2 \angle 120^\circ \quad (15)$$

$$I_{c2} = a^2 I_{a2} = a^2 I_2 = I_2 \angle 240^\circ \quad V_{c2} = a^2 V_2 = V_2 \angle 240^\circ \quad (16)$$

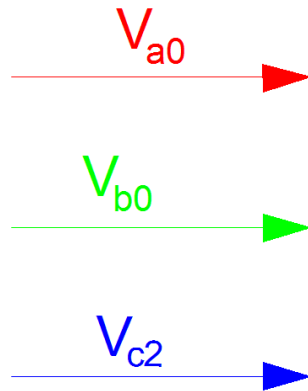


Mynd 18: Neikvætt fylgdar kerfi [4, Bls.4-4]

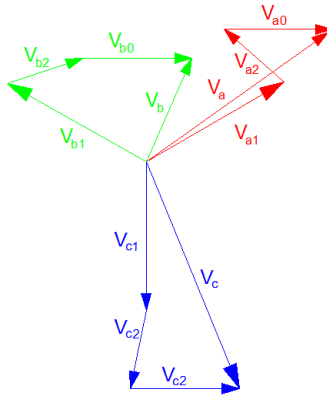
Núll fylgdarkerfi er öðruvísi en hin kerfin að því leyti að allir fasarnir eru í fasa. Eins og í hinum eru þeir allir jafn stórir. Á jöfnunum hér fyrir neðan sjást tengslin milli fasa og þar fyrir neðan á mynd 19 sést fasagraf af núll fylgdarkerfi. Á mynd 20 sést svo fasagraf af öllum kerfunum sett saman og hvernig fasa spennurnar V_a , V_b og V_c verða til [4].

$$I_{a0} = I_{b0} = I_{c0} = I_0 \quad (17)$$

$$V_{a0} = V_{b0} = V_{c0} = V_0 \quad (18)$$

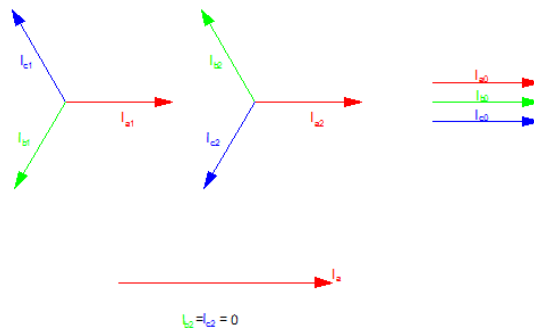


Mynd 19: Núll fylgdar kerfi [4, Bls.4-4]

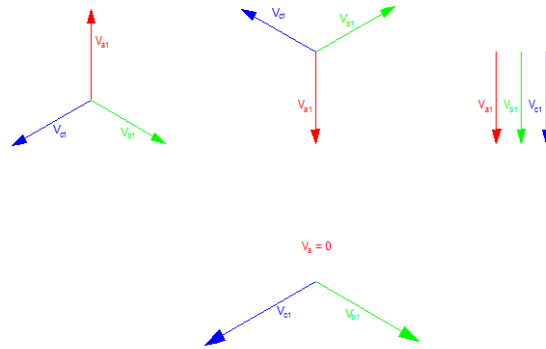


Mynd 20: öll þrjú kerfin saman á einu grafi [4, Bls.4-4]

Ef skoðuð er ein-fasa bilun á fasa a í þriggja fasa kerfi verða straumarnir I_b og I_c 0 A en I_a eykst mjög mikið. Spennunar V_b og V_c verða nánast óbreyttar en spennan á V_a verður 0 V. Það má sjá með því að horfa á fylgdarkerfin og á myndum 21 og 22 sést hvernig fylgdarkerfin verða við ein-fasa bilun. Í viðauka A má sjá hvernig fylgdarkerfin eru við aðrar gerðir af bilunum [4].



Mynd 21: Straumfylgdar kerfin við ein-fasa bilun á fasa a [5, Bls.145]

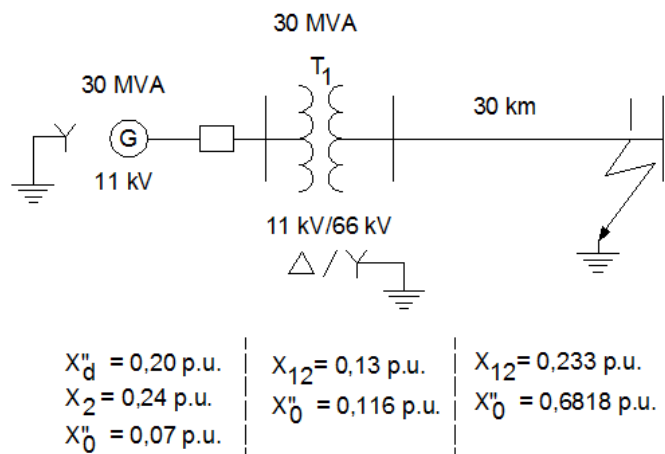


Mynd 22: Spennufylgdarkerfin við ein-fasa bilun á fasa a [5, Bls.145]

Í jarðbundnum kerfum verður spennuhækkun á jarðskauti þegar bilun verður. Spennuhækkunin fer eftir bilanastraum og hversu gott jarðskautið er. Samkvæmt verklýsingu Mannvirkjastofnunar má spennuhækkun vegna rekstrarstrauma um jarðskaut ekki fara yfir 50 V. Þetta á við þar sem jörðin er notuð til að flytja rekstrarstrauma. Skammtíma spennuhækkun sem stafar af ein-fasa bilun má aldrei fara yfir 1500 V. Jarðskautsviðnám varnarskaups háspennu má ekki fara yfir 10Ω . Þessum reglum ber að fylgja og ef jarðskaut eru ekki nógu góð er hægt að minnka bilanastraum með því að hafa kerfið fljótandi í staðinn fyrir jarðtengt [13].

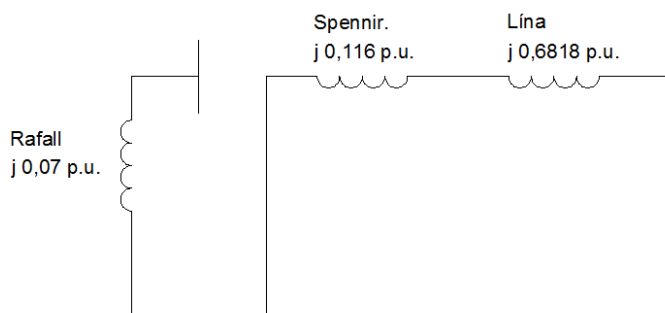
4.2.1 Útreikningar á ein-fasa bilun í jarðbundnu kerfi

Til þess að gera útreikninga þá var sett upp kerfi sem saman stóð af Rafala, Afspenni og 30 km langri loftlínu. Rafallinn er 30 MVA og spennan er 11 kV. Spennirinn er 30 MVA. Spennu hlutfallið er 11 kV/66 kV. Línan er hönnuð til þess að flytja 30 MVA og er 66 KV. Kennistærðir fyrir rafalann, spenninn og línuna er fengnar úr bókinni „Power systems modeling and fault analysis“. á mynd 23 sést hvernig kerfið er og helstu kennistærðir sem notaðar voru við útreikninga. Útreikningar eru gerðir út frá því að ein-fasa bilun verði á fasa a og 30 km frá spenni.

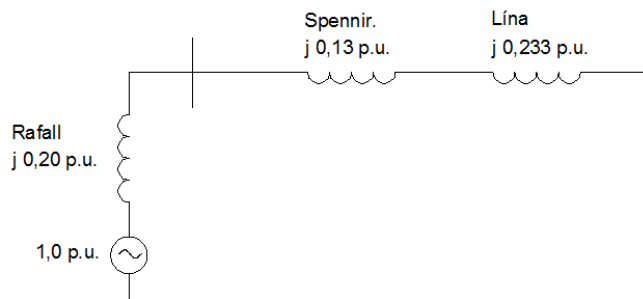


Mynd 23: Kerfi sem notað var við útreikninga

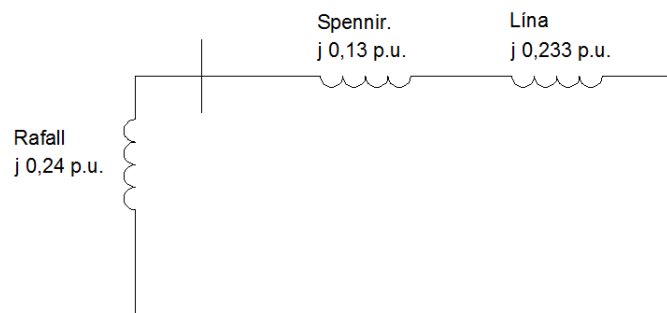
Þar sem ein-fasa bilun er ójafnlæg bilun þá þarf að skipta kerfinu í þrjú kerfi, jákvætt, neikvætt og núll fylgdarkerfi. Á myndum 24-26 sést hvernig kerfinu er skipt upp í þessi kerfi.



Mynd 24: Núll fylgdarkerfi

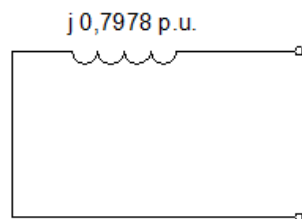


Mynd 25: Jákvætt fylgdarkerfi



Mynd 26: Neikvætt fylgdarkerfi

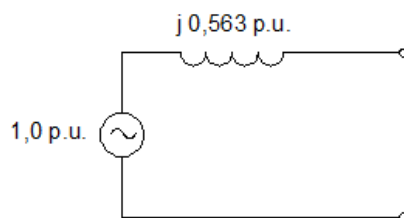
Gert er ráð fyrir að ekkert álag sé á línunni þegar bilunin verður. Þannig að jafngildisrásir fyrir öll kerfin verða þá eins og myndir 27 - 29 sýna. jafngildisrásirnar er sýndar frá sjónarhornir bilunarstaðarins.



Mynd 27: Núll fylgdarkerfi

$$Z_0 = Z_{0spennir} + Z_{0lna} = 0,116 + 0,6818 \quad (19)$$

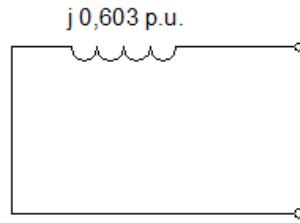
$$Z_0 = 0,7978p.u. \quad (20)$$



Mynd 28: Jákvætt fylgdarkerfi

$$Z_1 = Z_{1rafali} + Z_{1spennir} + Z_{1lna} = 0,20 + 0,13 + 0,233 \quad (21)$$

$$Z_1 = 0,563 p.u. \quad (22)$$

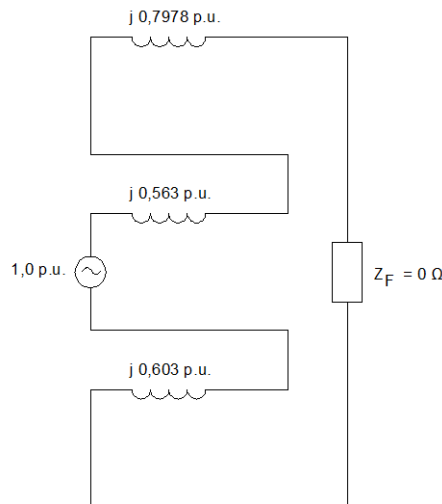


Mynd 29: Neikvætt fylgdarkerfi

$$Z_2 = Z_{2rafali} + Z_{2spennir} + Z_{2lna} = 0,22 + 0,13 + 0,233 \quad (23)$$

$$Z_2 = 0,563 p.u. \quad (24)$$

Næsta sem er gert er að raðtengja öll kerfin. Z_n er 0Ω því kerfið er fast jarðtengt og þess vegna hefur rýmdar-viðnámið milli línunnar og jarðar ekki áhrif á bilunarstrauminn og því er sleppt. Þá lítur jafngildisrásin fyrir þetta kerfi út eins og á mynd 30.



Mynd 30: Raðtenging kerfana

Næst var að reikna út straumana I_0, I_1 og I_2 . Þar sem kerfin eru raðtengd eru þeir allir jafn stórir. Til þess að finna bilanastrauminn þá eru allir þessir straumar lagðir saman.

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{V_F}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3 \cdot Z_F} \quad (25)$$

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{1,0 \angle 0}{0,7978 + 0,563 + 0,603} = -j0,509217 p.u. \quad (26)$$

$$I_a'' = 3 \cdot -j0,509217 = -j1,52765 p.u. \quad (27)$$

$$I_{base} = \frac{30 MVA}{\frac{66 kV}{\sqrt{3}}} = 787,29 A \quad (28)$$

$$I_a'' = -j1,52765 \cdot 787,29 = 1207,7 \quad \angle -90^\circ A \quad (29)$$

Þannig að bilanastraumurinn verður 1207,7 A við ein-fasa bilun sem verður 30 km frá spenninum. Nú verður skoðað hvernig spennurnar á fösunum verða eftir bilunina. Fyrst þarf að reikna V_0, V_1 og V_2 og svo eru fasa spennurnar reiknaðar út frá þeim. Þetta má sjá á jöfnunum hér fyrir neðan.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_F \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1,0 \quad \angle 0^\circ \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0,7978 & 0 & 0 \\ 0 & 0,563 & 0 \\ 0 & 0 & 0,603 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -j0,509217 \\ -j0,509217 \\ -j0,509217 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,406253 \\ 0,713311 \\ -0,307058 \end{bmatrix} p.u. \quad (32)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1,0\angle -120^\circ & 1,0\angle 120^\circ \\ 1 & 1,0\angle 120^\circ & 1,0\angle -120^\circ \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -0,406253 \\ 0,713311 \\ -0,307058 \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1,07\angle -124,6^\circ \\ 1,07\angle -124,6^\circ \end{bmatrix} p.u. \quad (35)$$

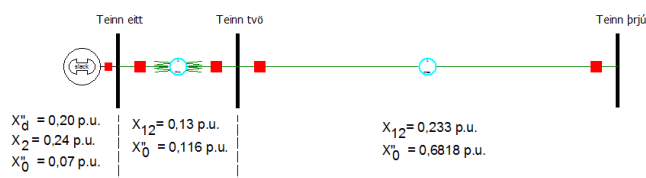
$$V_{Ln} = V_{p.u.} \cdot _baseLN \quad (36)$$

$$\begin{cases} V_{ag} = 0 \cdot \frac{66kV}{\sqrt{3}} = 0 \\ V_{bg} = 1,07\angle -124,6^\circ \cdot \frac{66kV}{\sqrt{3}} = 40,7\angle -124,6^\circ \quad kV \\ V_{cg} = 1,07\angle 124,6^\circ \cdot \frac{66kV}{\sqrt{3}} = 40,7\angle 124,6^\circ \quad kV \end{cases} \quad (37)$$

Á þessum reikningum sést að bilanastraumurinn verður frekar hár eða 1207 A en spennurnar á fösunum sem ekki eru bilaðir hækka aðeins en ekki mikið.

4.2.2 Hermun ein-fasa bilunar í jarðbundnu kerfi

Hægt er að notast við hermi forrit til þess að reikna út raforkukerfi. Í Kafla 4.3.1. var ein-fasa bilun í jarðbundnu kerfi reiknuð í höndunum. Í þessum kafla var sama kerfið og notað var í kafla 4.2.1. Sett í upp í forritinu „Power World“. Forritið var notað til þess að gera sömu reikninga og gerðir voru í kafla 4.2.1. Kennistærðirnar sem sjást á mynd 31 voru setta inn í forritið. Í forritun var hægt að velja hvernig innbyrðis tengingar á forvöfum og eftirvöfum spennisins er háttáð og var valið þríhyrningstenging á forvafi og stjörnutenging á eftirvafi. Einnig gefur forritið möguleika að hafa stjörnuna jarðbundna eða ekki. Í þessum kafla var stjarnan höfð jarðtengd. Á mynd 31 sést kerfið í forritinu. Forritið var stillt þannig að bilun yrði á fasa a á teini 3. Bilunin var höfð á teininum því línan er 30 km og bilun á endanum á henni er því á teininum.



Mynd 31: Kerfi í Power World

Hægt var að stilla í forritinu hvert viðnámið í biluninni sjálfri væri og var það haft 0Ω eins og það var haft við útreikningana í kafla 4.2.1. í töflu 1 sést niðurstöður út úr reikningum sem forritið gerði.

Tafla 1: Spenna og fashorn á fösum A, B og C

Teinn	A (p.u.)	B (p.u.)	C (p.u.)	$\angle A$	$\angle B$	$\angle C$
Teinn eitt	0,776	0,965	0,965	0,0	-113,7 °	113,7 °
Teinn tvö	0,584	0,962	0,962	0,0	-113,7 °	113,7 °
Teinn þrjú	0,0	1,073,	1,073	0,0	-124,6 °	124,6 °

Í kafla 4.2.1 þá voru spennur og straumar reiknaðir út frá bilunarstað. Hermi forritið reiknar út spennur á öllum teinum. Ef við berum saman útreikninga úr kafla 4.2.1 og útreikninga úr forritinu þá skoðum við línu 3 í töflu 1 og jöfnu 35. Þá sést að þetta er alveg sambærilegar niðurstöður.

Einnig reiknar forritið út strauma í kerfinu og í töflu 2 sjást niðurstöður úr forritinu.

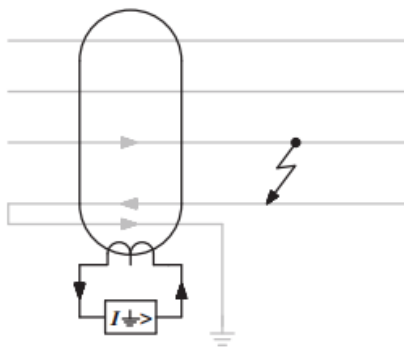
Tafla 2: Straumar á fösum A, B og C

Teinn	Fasi A (p.u.)	Fasi B (p.u.)	Fasi C (p.u.)
Milli teina 1 og 2	1,018	0,509	0,509
Milli teina 2 og 3	1,527	0,0	0,0

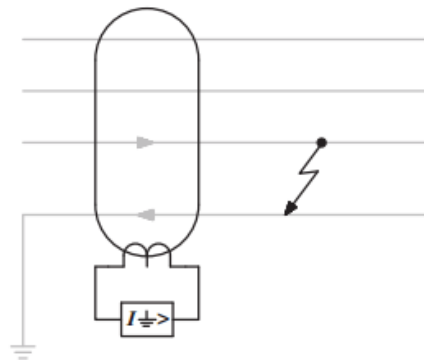
Á jöfnu 27 sést niðurstaða úr útreikningum á bilunarstraum í kerfinu og þá sést að það er sama gildið og er á fasa A milli teina 2 og 3 í töflu 2.

4.2.3 Jarðhlaupsvarnir í jarðbundnum kerfum

Í kerfum sem eru jarðbundin í gegnum ekkert eða lítið viðnám getur straumur við ein-fasa bilun verið jafn hár og bilanastraumur vegna skammhlaups milli fasa. Bilanastraumurinn ákvarðast af viðnámínu í bilanarásinni. Viðnám í biluninni getur minnkað bilanastrauminn. Yfirleitt er summuspennan lág í þessum tilfellum. Jarðhlaupsvarnir í kerfum jarðtengdum í gegnum lítið eða ekkert viðnám eru svipaðar og varnir gegn skammhlaupi nema þær vinna með summustrauma en ekki fasastrauma. Oft eru fjarlægðavarnir notaðar til þess að finna ein-fasa bilanir. Ein-fasa bilanir með háu viðnámi geta einnig fundist með því að mæla summustrauma [14]. Þegar aukna nákvæmni þarf er ekki hægt að notast við venjulega straummælaspenna heldur þarf að nota spenna sem eru þannig að leiðarinn fer í gegnum þá. Spennirinn er hringlaga og er utan um leiðarann. Allir fasarnir eru teknir í gegnum spenninn og ef skermingin er jarðtengd þarf skermingin að koma til baka í gegnum spenninn. Með þessari aðferð er summustraumurinn mældur eða jarðstraumurinn. Á myndum 32 og 33 sést rétt tenging á þessari aðferð og röng tenging [4].



Mynd 32: Rétt tenging [4, Bls.9-17]

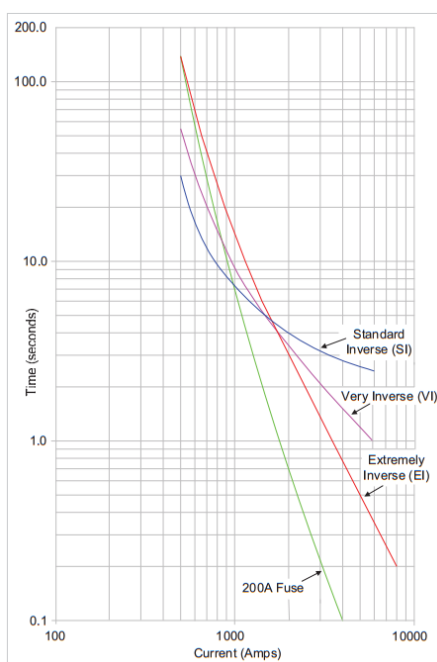


Mynd 33: Röng tenging [4, Bls.9-17]

Einnig er hægt að mæla summustraum með því að nota þrjá straummælaspenna og hliðtengja eftirvöfin.

Stefnuvirk jarðhlaupsvörn fæst með því að mæla summustraum og hornið á milli summustraum og summuspennu. Valvísí eykst með því að nota stefnuvirkar varnir í staðinn fyrir óstefnuvirkar varnir. Bilanir með háu viðnámi er einnig hægt að finna með stefnuvirkum vörnum. Frá sjónarhorni varnarliðans er summustraumurinn á eftir summuspennunni í kerfum með engu viðnámi í jarðtengingu. Hornið milli straums og spennu verður frá 40° til 90° [14].

Nákvæm óstefnuvirk andhverfutíma yfirstraumsvörn er yfirleitt hægt að nota þegar valvísí þarf að vera góð. Yfirstraumsvarnir með andhverfum tíma eða mjög andhverfum tíma eru þannig að tímaseinkun eykst með lækkandi straum. Það er notað til þess að fá valvísí milli varna [14]. Á mynd 34 sést munur á vörnum með andhverfum tíma og mjög andhverfum tíma.

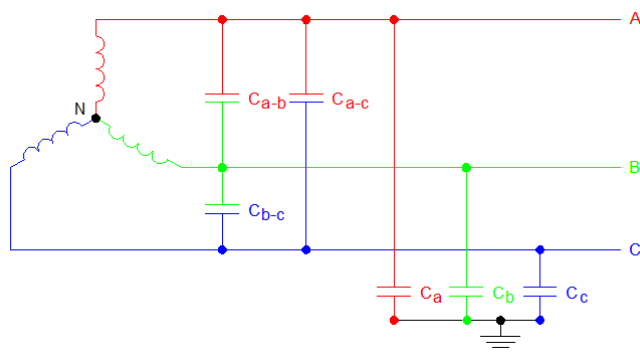


Mynd 34: Kennilínur yfirstraumsvarna með Andhverfum tíma [4, Bls.9-8]

5 Fljótandi dreifikerfi

Fljótandi raforkukerfi er kerfi sem hafa enga tengingu frá fösum í kerfinu til jarðar. Í jarðbundnum kerfum er tengingin yfirleitt í gegnum núllpunkta stjörnutengda aflspenna. Eina jarðtengingin í fljótandi kerfum er í gegnum rýmdaráhrif milli leiðara og jarðar. Fljótandi kerfi geta verið notuð til þess að halda stöðugleika í kerfum og koma í veg fyrir tíðar og kostnaðarsamar útleysingar. Einnig getur verið nauðsynlegt að notast við fljótandi kerfi í kerfum sem eru með tíðar tímabundnar ein-fasa bilanir. Tímabundnar bilanir geta til dæmis verið vegna seltuvandamála, fugla sem ná að snerta fasa og búnað sem er jarðtengdur á sama tíma eða önnur dýr sem komast í tæri við háspenntan búnað [9].

Vegna þess að það er engin leið fyrir strauminn í ein-fasa bilun til baka nema í gegnum rýmdaráhrif milli fasa og jarðar verður straumurinn yfirleitt mjög lítill, sérstaklega í kerfum með frekar lágri spennu, t.d. 11 kV og 33 kV. Þannig skemmdir í búnaði verða litlar og þar af leiðandi getur verið að það sé ekki nauðsynlegt að einangra bilunina eins fljótt og auðið er eins og þarf að gera í jarðbundnum kerfum [9]. Á mynd 35 sést fljótandi kerfi.

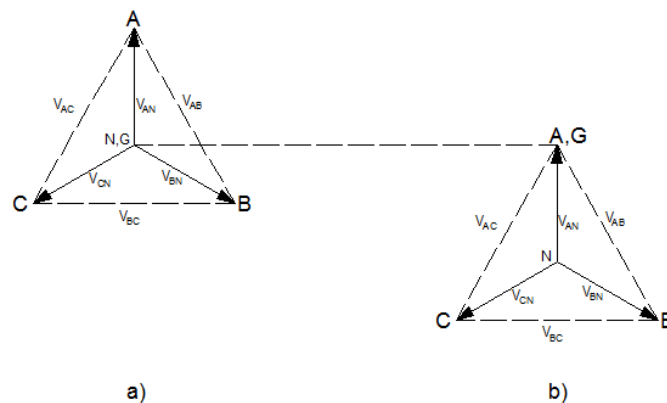


Mynd 35: Fljótandi raforkukerfi [6, Bls.3]

5.1 Ein-fasa bilun

Þegar ein-fasa bilun verður í fljótandi kerfum verður í raun ekki skammhlaup þar sem straumurinn hefur ekki greiða leið til baka því kerfið hefur ekki tengingu til jarðar nema í gegnum rýmdaráhrif milli fasa og jarðar. Vegna þess getur aðeins lítill straumur runnið og fer það eftir því hve viðnámið í biluninni er mikið og hve mikil rýmdaráhrif eru í kerfinu. Aðalávinningur fljótandi kerfis er að við ein-fasa bilun heldur spennuþríhyrningurinn sér og því getur kerfið haldið áfram í rekstri. Þegar ein-fasa bilun verður minnkar spennan á þeim fasa nánast niður í núll en spennan á hinum fösunum hækkar sem nemur margfeldinu á $\sqrt{3}$ og spennuvektorar hliðrast um 30° í átt hvor að öðrum [7].

Í kerfum sem eru í jafnvægi og ekki með bilun er núll straumfylgd 0 A. Í þessu ástandi er engin spenna milli núllpunkts og jarðar V_{NG} . Í raunveruleikanum eru kerfi ekki þannig því um leið og fasarnir eru eitthvað mislestaðir færast núllpunkturinn aðeins. Þegar eins fasa bilun verður með viðnámið 0Ω verður spennan á milli núllpunkts og jarðar hin sama og neikvæð spenna á milli fasa og jarðar. Á mynd 36 sést fasagraf af kerfi sem er í lagi annars vegar og kerfi sem er með eins fasa bilun á fasa A hinsvegar [7].



Mynd 36: Spennu þríhyrningur fyrir fljótandi kerfi [7, Bls.2]

Á myndinni sést hvernig kerfið hliðrast um jarðpunkt. Fasi A er kominn á sama stað og jörðin. Núllpunkturinn er kominn jafnt langt frá jörðinni og fasi A var fyrir bilunina. Fasar B og C eru nú með sömu spennu til jarðar og var milli fasa fyrir bilunina. Þ.e.a.s. $V_{BG} = V_{BA}$, $V_{CG} = V_{CA}$. Þó svo bilanastraumur minnki mjög mikið við að hafa kerfi fljótandi fer það einnig eftir því hvernig kerfi eru uppbyggð. Ef kerfi eru uppbyggð eingöngu með loftlínunum verður rýmdin í kerfinu mjög lítil og þar af leiðandi lítill bilanastraumur. Ef kerfi eru að miklu leyti byggð upp af jarðstrengjum eykst rýmdin í kerfinu mjög mikið og þá eykst einnig bilanastraumurinn [7]. Eins og sést á mynd 42 er bilanastraumurinn tæp 100 A í kerfi sem er fljótandi og með jarðstrengjum [8].

5.1.1 Útreikningar á ein-fasa bilun í fljótandi kerfi

Á mynd 37 má sjá sama kerfi og í kafla 4.2.1 nema að í þessum kafla verðu kerfið haft fljótandi. Þ.e. núll punktar kerfisins ekki jarðtengdir. Sömu kennistærðir eru notaðar og ein bætist við en það er rýmdar-viðnámið milli línunar og jarðar. Bilunin er höfð á fasa A eins og í dæminu með jarðbundna kerfinu. Fyrsta sem var gert var að finna rýmdar-viðnámið milli fasa og jarðar og sést hvernig það var reiknð á jöfnum 38 til 42.

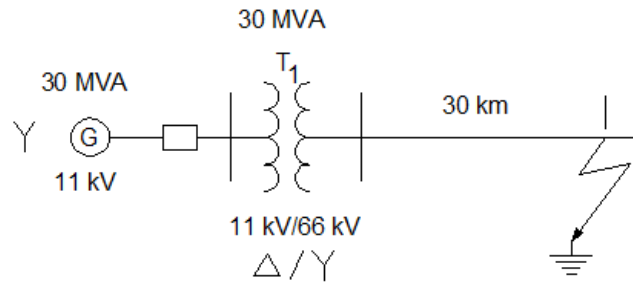
$$B_z = 0,6\mu s/km \quad (38)$$

$$B_z = 0,6\mu s/km \cdot 30km = 18 \mu s \quad (39)$$

$$X_c = \frac{1}{18\mu} = 55,5 \text{ } k\Omega \quad (40)$$

$$X_c = \frac{55,5k\Omega}{48,4} = 1147,84 \text{ } p.u. \quad (41)$$

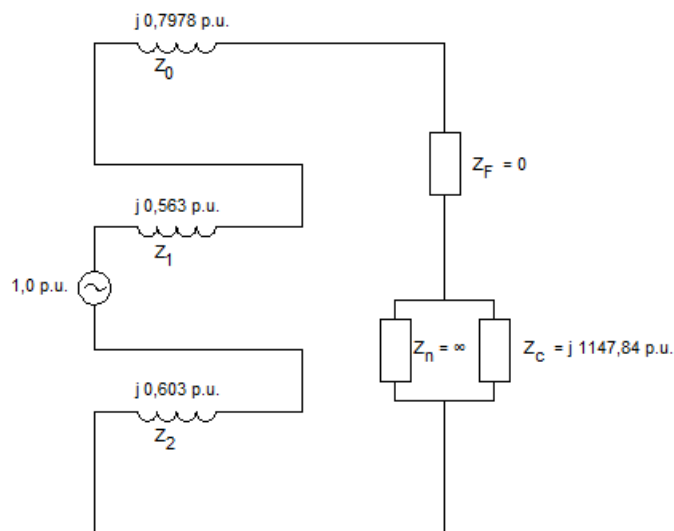
$$Z_F = 1147,84 \text{ } p.u. \quad (42)$$



$X_d'' = 0,20 \text{ p.u.}$	$X_{12} = 0,13 \text{ p.u.}$	$X_{12} = 0,233 \text{ p.u.}$
$X_2 = 0,24 \text{ p.u.}$	$X_0'' = 0,116 \text{ p.u.}$	$X_0'' = 0,6818 \text{ p.u.}$
$X_0'' = 0,07 \text{ p.u.}$		

Mynd 37: líkan af fljótandi raforkukerfi

Fylgdarkerfin fyrir þetta kerfi verða eins og fyrir bilunina í jarðbundna kerfinu og sjást myndir af þeim á myndum 25 til 29. Gert er ráð fyrir að viðnámið í biluninni sjálfri sé 0Ω . Kerfið er fljótandi þannig að viðnámið milli núllpunkt spennis og jarðar er óendanlega hátt þannig að eina sem hefur áhrif á bilunarstrauminn er rýmdar-viðnámið milli línunnar og jarðar og er það kallað Z_c .



Mynd 38: Raðtenging fylgdar kerfa fyrir fjótandi kerfi

Þá er hægt að reikna bilanastrauminn og er það gert með sama hætti og í jarðbundnu kerfi nema að við bætist Z_c og verða útreikningarnir eftirfarandi:

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{V_F}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3 \cdot Z_F} \quad (43)$$

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{1,0 \angle 0}{0,7978 + 0,563 + 0,603 + 3 \cdot 1147,84} = -j0,00029 p.u. \quad (44)$$

$$I_a'' = 3 \cdot -j0,00029 = -j0,000871 p.u. \quad (45)$$

$$I_a'' = -j0,000871 \cdot 787,29 = 0,685 \quad \angle -90^\circ A \quad (46)$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1,0 \quad \angle 0^\circ \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0,7978 + 3 \cdot 1147,84 & 0 & 0 \\ 0 & 0,563 & 0 \\ 0 & 0 & 0,563 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -j0,00029 \\ -j0,00029 \\ -j0,00029 \end{bmatrix} \quad (47)$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,99885 \\ 0,99984 \\ -0,00018 \end{bmatrix} p.u. \quad (48)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1,0 \angle -120^\circ & 1,0 \angle 120^\circ \\ 1 & 1,0 \angle 120^\circ & 1,0 \angle -120^\circ \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -0,99885 \\ 0,99984 \\ -0,00018 \end{bmatrix} \quad (49)$$

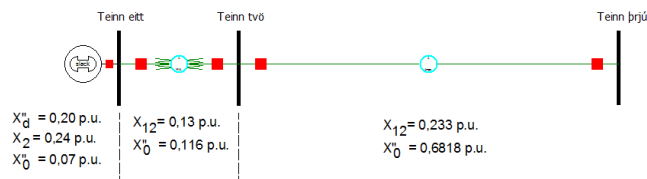
$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1,73 \angle -149,9^\circ \\ 1,73 \angle 149,9^\circ \end{bmatrix} p.u. \quad (50)$$

$$\begin{cases} V_{ag} = 0 \cdot \frac{66kV}{\sqrt{3}} = 0 \\ V_{bg} = 1,73 \angle -149,9^\circ \cdot \frac{66kV}{\sqrt{3}} = 65,9 \angle -149,9^\circ \text{ kV} \\ V_{cg} = 1,73 \angle 149,9^\circ \cdot \frac{66kV}{\sqrt{3}} = 65,9 \angle 149,9^\circ \text{ kV} \end{cases} \quad (51)$$

Á þessum útreikningum sést að bilanastraumurinn verður nánast enginn. Það er vegna þessa að kerfið er alveg fljótandi og er ekki með jarðstrengi heldur einungis loftlínu. Einnig sést að spennan á fösum sem ekki eru bilaðir hækkar sem nemur margfeldinu á $\sqrt{3}$ og verður spennan frá fösum b og c til jarðar sama og spennan milli fasa eða 66 kV.

5.1.2 Hermun ein-fasa bilunar í Fljótandi kerfi

Eins og gert var í kafla 4.2.2 þá var fljótandi kerfi einnig sett í Hermi forritið. Uppsetningin var eins og mynd 39 sýnir. Sömu kennistærðir voru notaðar. Það sem var gert öðruvísi var að spennirinn var hafður ójarðbundin en forritið býður upp á þann möguleika.



Mynd 39: Fljótandi kerfi í Power World

Tafla 3: Spenna og fashorn á fösum A, B og C í fljótandi kerfi

Teinn	A (p.u.)	B (p.u.)	C (p.u.)	$\angle A$	$\angle B$	$\angle C$
Teinn einn	0,999	0,999	0,999	0,0	-119,99 °	119,99 °
Teinn tvö	0,0	1,730	1,730	0,0	-149,97°	149,97°
Teinn þrjú	0,0	1,730,	1,730	0,0	-149,97 °	149,97 °

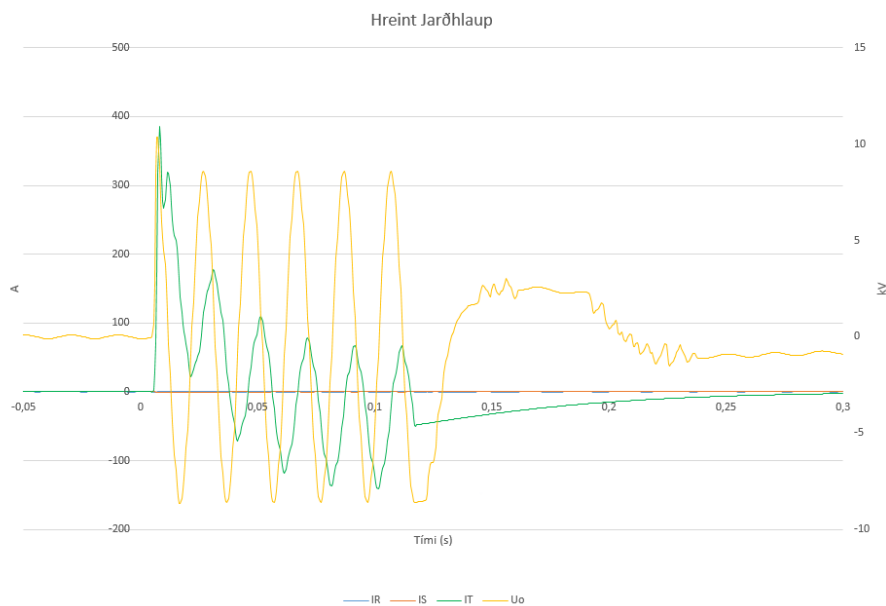
Tafla 4: Straumar á fösum A, B og C í fljótandi kerfi

Teinn	Fasi A (p.u.)	Fasi B (p.u.)	Fasi C (p.u.)
Milli teina 1 og 2	0,00175	0,00088	0,00088
Milli teina 2 og 3	0,00263	0,0	0,0

Í töflum 3 og 4 sjást niður stöður út úr forritinu en á jöfnum 50 og 45 sjást niðurstöður út úr reikningum og ef þetta er borið saman þá sést að niðurstaðan er mjög sambærileg.

5.1.3 Prófun varnarliða

Dreifikerfi Rarik er að miklum hluta fljótandi. Það samanstendur bæði af loftlínnum og jarðstrengjum. Fyrir stuttu tók Rarik í notkun nýja aðveitustöð en hún er staðsett að Holti undir Eyjafjöllum. Höfundur var viðstaddur þegar starfsmenn Rarik voru að prófa jarðhlaupsvarnir fyrir einn útganginn í stöðinni. Prófunin fór þannig fram að jarðstrengur sem tengdur var á útganginn var aftengdur og svo var einn útgangurinn tengdur til jarðar. Byrjað var á L_1 og svo L_2 og síðast L_3 . Næst var skotið inn á útganginn og svo séð hvernig liðinn vann. Í öllum tilfellum vann liðinn og aflrofi sló út. Þar sem fleiri útgangar eru í stöðinni voru liðarnir á þeim útgöngum stilltir þannig að þeir myndu örugglega ekki slá út því þeir eru tengdir og eru í notkun. Á mynd 40 sést þegar L_3 er prófaður. Það sést vel hvernig U_0 hækkar mikið við bilunina og straumurinn í fasanum sem tengdur er til jarðar hækkar einnig mikið og fer í tæp 400 A. Þetta er mikill straumur miðað við að kerfið sé fljótandi. Þar sem kerfið hjá Rarik er mikið í jarðstrengjum eru rýmdaráhrifin mun meiri en ef kerfið væri allt í loftlínnum sem getur útskýrt þennan mikla straum. Einnig sést á myndinni að bilunin varir í um 100 ms en það var í samræmi við stillingu liða. Straumur í fösum L_1 og L_2 er 0 A allan tímann þar sem ekki var álag á útganginum.

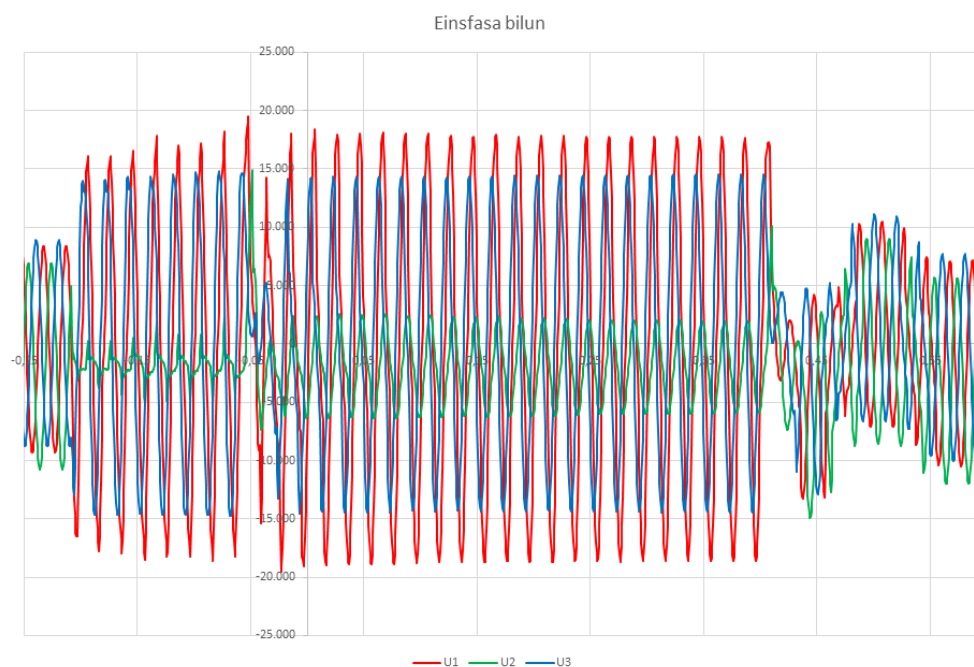


Mynd 40: Tilbúin ein-fasa bilun [8]

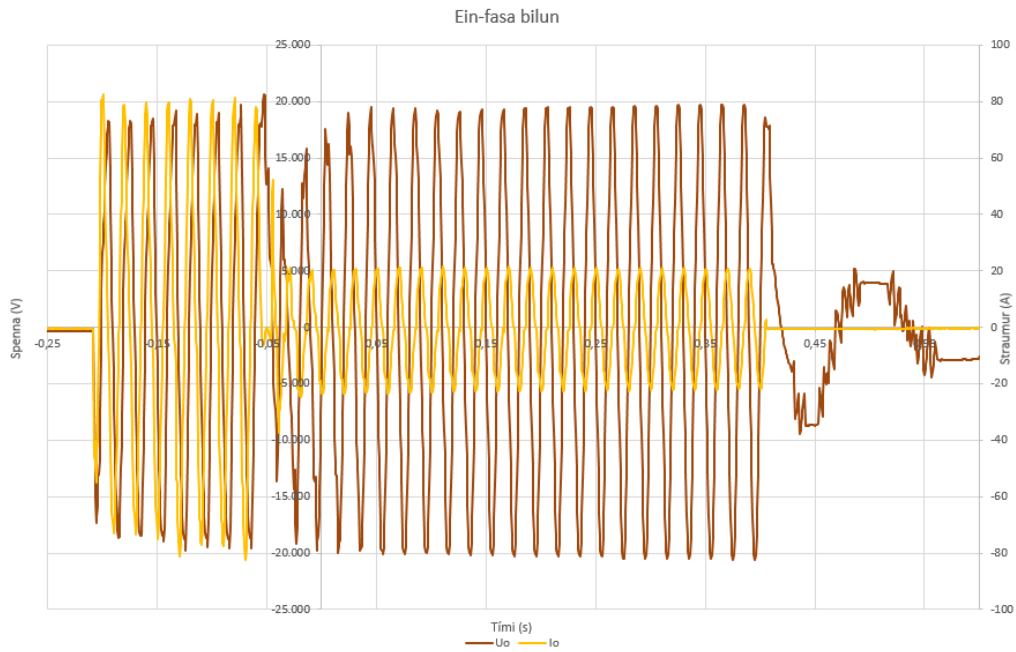
5.1.4 Dæmi um bilun

Á myndum 41 og 42 sést raunveruleg ein-fasa bilun sem varð í dreifikerfi Rarik á Austurlandi. Á tímaásnum á mynd 41 sést að bilunin byrjar um -0.25 til -0.20. Þá sést greinilega hvernig spennan á bilaða fasanum S dettur niður og verður að jörð en aftur á móti hækkar spennan á fösum R og T. Á mynd 42 sést hvernig I_0 og V_0 hagar sér. Þegar bilunin verður snarhækkar bæði I_0 og V_0 . En svo þegar nálgast 0 á tímaásnum breytist fasamunurinn á milli I_0 og V_0 [8].

Það kom svo í ljós að það sem gerðist var að spennuhækkunin á hinum fösunum varð valdur að skemmd í einangrun annarsstaðar í kerfinu. Daginn eftir varð önnur bilun í sama kerfi sem rekja mátti til skemmdar í einangrun vegna fyrri bilunarinnar [8].



Mynd 41: Fasa spennur í ein-fasa bilun [8]



Mynd 42: I_0 og V_0 í Ein-fasa bilun [8]

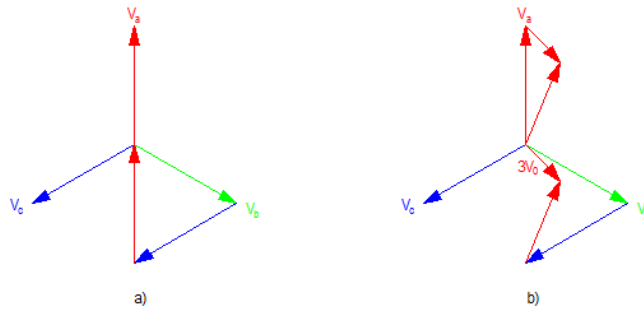
5.1.5 Jarðhlaupsvarnir í fljótandi kerfum

Að greina ein-fasa bilun í fljótandi kerfi er mun erfiðara en í kerfi sem er jarðbundið. Það er vegna þess að í fljótandi kerfi verður bilanastraumur mjög lítill. Aðferðir sem hægt er að nota til þess að finna ein-fasa bilun í fljótandi kerfi eru aðallega tvær, að greina núll spennufylgd í kerfinu eða greina fasahorn á milli núll spennufylgdar og núll straumfylgdar. Ástæðan fyrir því að núll fylgdarþættir kerfisins eru notaðir en ekki jákvæðu eða neikvæðu er að núll fylgdarviðnámið er miklu stærra en jákvæða fylgdarviðnámið og neikvæða fylgdarviðnámið og því hægt að sleppa þeim [6].

Þegar kerfið er fullkomlega jafnlægt er summuspenna allra fasanna 0 V en þegar straumar í fösunum verða misjafnir þá byrjar summuspennan að hækka. Þessi spenna er einnig kölluð núll spennufylgd. Á mynd 43.a sést fasagraf af fullkomlega jafnlægu kerfi en á mynd 43.b sést kerfi sem er mislestað og á henni sést núll spennufylgd [4].

Á útreikningum hér fyrir neðan sést dæmi um kerfi sem er rekið er á 11 kV. Annars vegar þegar það er í lagi og hinsvegar þegar eins fasa bilun er í gangi. Til einföldunar er gert ráð fyrir að kerfið sé jafnlægt fyrir bilunina.

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \quad (52)$$



Mynd 43: núll spennufylgd [4, Bls.9-18]

$$V_0 = \frac{1}{3} \left(\frac{11kV}{\sqrt{3}} \cdot e^{j0^\circ} + \frac{11kV}{\sqrt{3}} \cdot e^{j120^\circ} + \frac{11kV}{\sqrt{3}} \cdot e^{j-120^\circ} \right) = 0 \quad (53)$$

$$V_0 = \frac{1}{3} \left(0 + \sqrt{3} \left(\frac{11kV}{\sqrt{3}} \cdot e^{j-150^\circ} \right) + \sqrt{3} \left(\frac{11kV}{\sqrt{3}} \cdot e^{j150^\circ} \right) \right) = -6.35kV \quad (54)$$

Þegar ein-fasa bilun verður dettur einn fasi út og í rauninni kemur það út sem mikið ójafnvægi og þá hækkar núll spennufylgdin upp í það sama og fasa-núll spennan í kerfinu er [5].

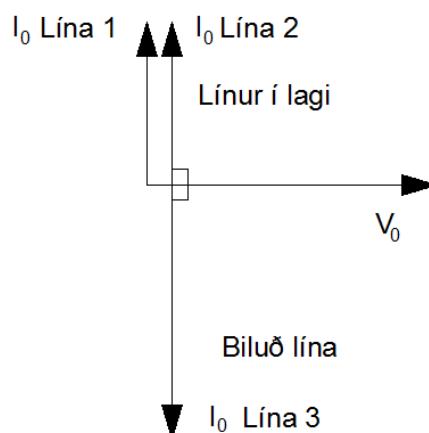
Til þess að finna núll spennufylgd í kerfinu er hægt að nota þriggja fasa spennumælaspenni og hafa eftirvafið tengt í opinn þríhyrning. Þegar kerfið er í rekstri mælist alltaf einhver spenna yfir opnu þríhyrningstenginguna og er það vegna mislestunar á fösunum. Mikilvægt er að liðarnir sem spennumælaspennarnir eru tengdir við séu stilltir þannig að þeir leyfi einhverja núll spennufylgd svo kerfið slái ekki út þegar ekki er bilun heldur bara mislestun á fösunum [4].

Spennumisvægi verður þegar fasar eru ekki jafn lestaðir. Gildi á neikvæðu spennufylgdinni getur verið notað sem mælikvarði á spennumisvægi í þriggja fasa kerfi. Neikvæð spennufylgd þarf að vera minni en 2 % á kerfum með hærri spennu en 35 kV og minni en 3 % á kerfum með lægri spennu en 35 kV. Þá er miðað við meðaltal á 10 mínútum og 95 % af tímanum. En þar sem mikið er um einsfasa dreifingu þá er heild meiri frávik. Þess vegna er nauðsynlegt að leyfa a.m.k svo háa núll spennufylgd. Æskilegt getur verið að leyfa meiri núll spennufylgd svo það fari ekki á milli mála að um sé að ræða bilun en ekki bara mislestun á fasa [15].

Þessi aðferð hentar þegar ekki er gerð krafa um valvísi t.d. þegar einungis er ein lína

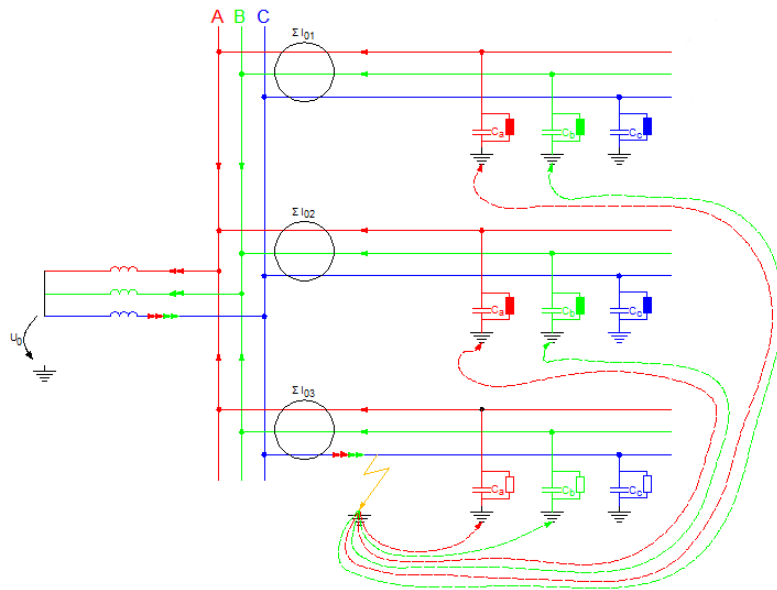
en ekki margar línur á sama teini. Það er vegna þess að núll spennufylgd kemur fram í öllu kerfinu og liðarnir sem eru nálægt biluninni sjá einnig hækkunina á núll spennufylgdinni og því gæti stærra svæði farið út en þarf [4]. Þegar fleiri en ein lína er á teini og þessi aðferð er notuð er hægt að nota útilokunaraðferðina. Þá er ein lína í einu tekin út og kannað hvort núll spennufylgdin lækkar aftur niður í fyrra horf og ef svo er þá er bilunin á þeirri línu, ef ekki þá er hún sett inn aftur og næsta tekin út þar til bilunin finnst. Þessi útilokunaraðferð er mjög tímafrek og veldur því að línur sem ekki eru bilaðar eru teknar út sem veldur óþarfa truflun hjá notendum, sem er mikill ókostur [7]. Það getur verið mögulegt að nota tímagreiningu til að staðsetja bilunina en samt sem áður er ekki hægt að veita fullkomlega valvísa vörn með þessari aðferð. Kosturinn við þessa aðferð er að ekki þarf neina straumspennuspenna við hana því einungis er notast við spennumælingar [4].

Þar sem núll spennufylgdin kemur fram í öllu kerfinu hentar ekki að horfa eingöngu á hana þegar valvísi þarf að vera góð. Þá er unnt að nota aðferð sem notast við núll spennufylgd annars vegar og núll straumfylgd hins vegar. Þá er fashornið á milli núll spennufylgdar og núll straumfylgdar borið saman. Á línunum sem eru í lagi er núll straumfylgdin 90° á undan núll spennufylgdinni en þegar ein-fasa bilun verður, verður núll straumfylgdin á þeirri línu 90° á eftir spennunni. Með þeim hætti er unnt að finna eins fasa bilanir í fljótandi kerfum. Á mynd 44 sést fasagraf af línu sem ekki er með bilun og svo línu sem er með bilun [9].



Mynd 44: Samband milli I_0 og U_0 [9, Bls.485]

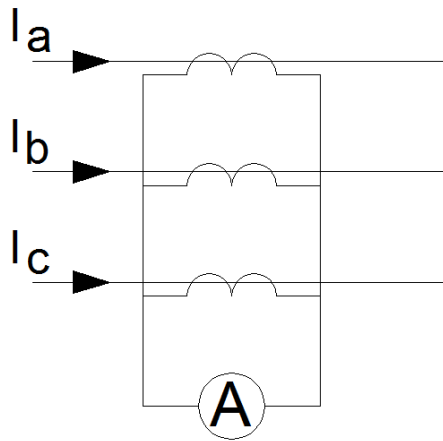
Til þess að átta sig betur á þessu sjáum við á mynd 45 einlínunmynd af fljótandi kerfi með þremur línunum tengdum við sama teininn og á einni þeirra verður ein-fasa bilun.



Mynd 45: Fljótandi kerfi með ein-fasa bilun á einni línu [10, Bls.98]

Þegar ein-fasa bilun verður á einni línunni verður núll spennufylgd kerfisins jöfn fasa-núll spennunni við venjulegt ástand. Ef núll straumfylgdin í öllum línunum er í fasa er bilunin fyrir framan útgangana, þ.e. á teininum. Ef núll straumfylgdin hefur umpólast er bilunin í einhverri línunni. Í biluðu línunni er núll straumfylgdin jafn rýmdarstráumnum í öllu kerfinu fyrir utan biluðu línuna. En núll straumfylgdin í línunni sem er í lagi er samanlagður þriggja fasa stráumur í þeirri línu. Núll straumfylgdin í biluðu línunni rennur frá biluninni og í átt að teininum en í línunum sem eru í lagi rennur hann í átt að enda línanna. Þess vegna er núll straumfylgdin í biluðu línunni hærri en í línunum sem eru í lagi. Stærðin á stráumnum sem rennur inn í bilaða fasann fer eftir rýmdarleiðninni milli fasa og jarðar á fösunum sem eru í lagi. Minna rýmdarviðnám eða meiri rýmdarleiðni veldur hærri bilanastráum. Stærð bilanastráumsins sem rennur í bilaða fasann fer því eftir rýmdarleiðninni í óbilaða hlutanum á kerfinu ef ekki er horft á viðnámið í biluninni sjálfri [9].

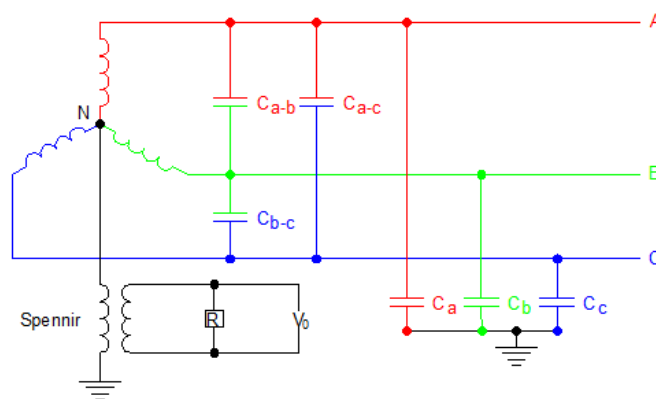
Núll spennufylgd er hægt að finna með spennumælaspennum eins og áður hefur verið fjallað um. Núll straumfylgd er hægt að mæla með því að hafa stráummælaspenna á hverjum fasa og hliðtengja svo eftirvöfin á þeim öllum við varnarliðann eins og sést á mynd 46 [4].



Mynd 46: Hliðtenging straummælaspenna [4, 9-15]

5.2 Háviðnáms jarðtenging

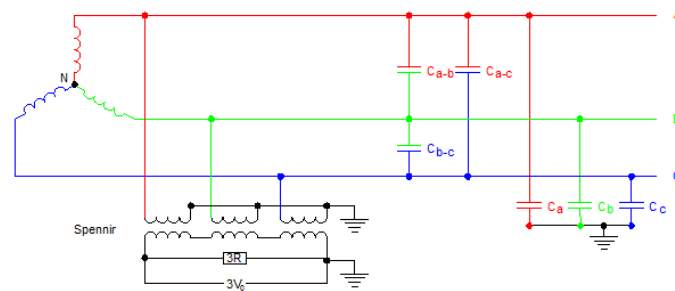
Háviðnáms jarðtenging er útfærð með þeim hætti að núllpunktur á rafölum eða spennum eru jarðbundnir í gegnum viðnám sem er jafnt eða aðeins minna en rýmd kerfisins til jarðar. Með þessari aðferð fæst lægri bilanastraumur en í jarðbundnu kerfi með ekkert eða lítið viðnám til jarðar. Lægri bilanastraumur veldur minni skemmdum. Einnig fæst lægri yfirspenna við bilun. Bilanastraumur getur verið á bilinu 1-25 A. Tvær útfærslur eru af háviðnáms jarðtengingu. Önnur er þannig að núllpunktur er jarðtengdur í gegnum forvaf á dreifispennti og svo er viðnám tengt yfir eftirvaf spennisins. Þegar þessi aðferð er notuð er hæsta V_0 sem getur orðið jafn hátt og fasa núll spennunni í kerfinu við eins fasa bilun með engu viðnámi, val á spennu verður að miðast við það. Á mynd 47 sést þessi útfærsla [5].



Mynd 47: Háviðnáms jarðtenging í gegnum spennu [5, Bls.233]

Hin aðferðin lýsir sér með þeim hætti að notast er við þrjá spenna sem eru tengdir inn

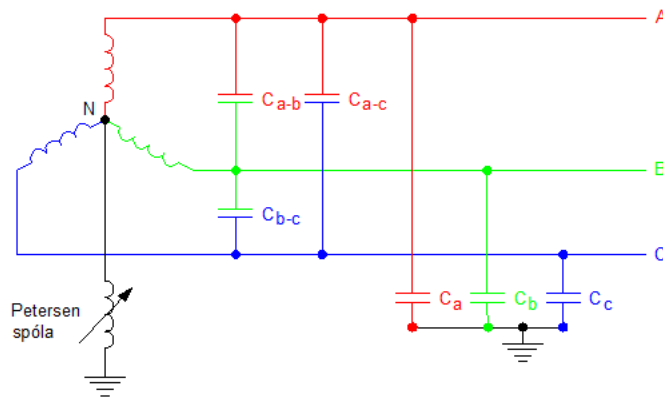
á sinn hvorn fasann og svo er eftirvafið tengt í opna þríhyrningstengingu og viðnám tengt yfir opnu þríhyrningstenginguna. Þegar eins fasa bilun verður hækkar spennan á hinum fösunum til jarðar og verður jöfn há fasa-fasa spennunni í kerfinu. Val á spennum verður að miðast við það. Fyrri aðferðin er notuð þegar aðeins einn rafall er í kerfinu en þegar margir rafalar eru tengdir saman inn á sama teininn er frekar notast við seinni aðferðina. Á mynd 48 sést seinni aðferðin [5].



Mynd 48: Háviðnáms jarðtenging í gegnum þrjá spenna [5, Bls.234]

5.3 Dreifikerfi jarðbundin í gegnum Petersen spólu

Kerfi sem eru jarðtengd í gegnum Petersen spólu lýsa sér með þeim hætti að núllpunktar eru jarðbundnir í gegnum háviðnámsspólu. Stærðin á spólunni þarf að vera slík að hún sé jöfn heildarrýmd milli fasa og jarðar í kerfinu. Þegar rýmd í kerfinu er jöfn span spólunar er talað um að kerfið sé fulljafnað eða að fullu samstillt. Ef span spólunar eru ekki jafnar rýmd kerfisins er kerfið ekki samstillt, það getur verið yfirjafnað eða undirjafnað. Það fer eftir sambandinu á milli stillingu spólunar og rýmdar í kerfinu. Á mynd 49 sést kerfi jarðtengt í gegnum Petersen spólu [6].



Mynd 49: Kerfi jarðtengt í gegnum Petersen spólu [6, Bls.7]

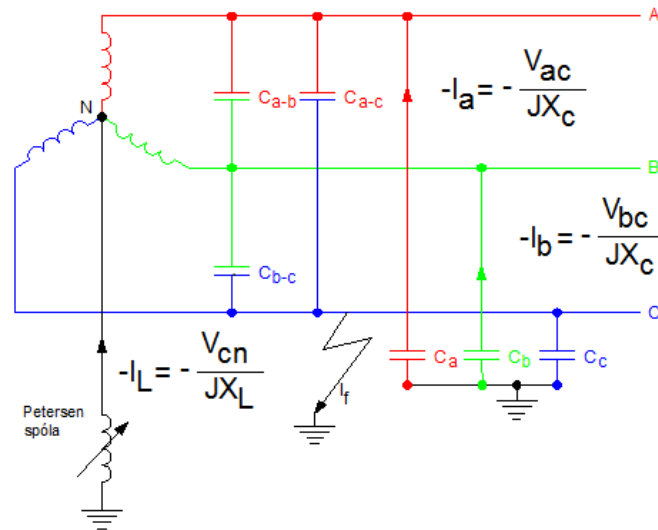
Í eldri kerfum af þessari gerð var spóla af fastri stærð og gat kerfið verið undirjafnað eða yfirjafnað ef kerfið breytist eitthvað. Breytileg spóla gefur möguleika á handstýrðri eða sjálfstýrðri stjórn á samtillingunni. Nýleg kerfi eru með spólu með hreyfanlegum kjarna sem er stýrður af stýrikerfi kerfisins. Það gefur kost á því að hafa kerfið allt að því 100% samstillt fyrir hvaða ástand sem er í kerfinu [6].

Kerfi sem eru jarðtengd með þessari aðferð geta minnkað bilanastraum vegna einsfasa bilunar niður í 3 – 10% af bilanastraum í fljótandi kerfum. Ef kerfið er 100% samstillt er það töp í spólu, yfirsveiflur í kerfinu og virkur lekastraumur sem ákvarða bilanastrauminn. Eins og fyrir háviðnáms jarðtengingu og fljótandi kerfi þarf einangrun til jarðar að þola fasa-fasa spennu kerfisins vegna hækkandi spennu á hinum fösunum við eins fasa bilanir [6]. Á mynd 50 hér fyrir neðan sést einsfasa bilun í kerfi sem er jarðtengt í gegnum Petersen spólu. Á jöfnum 55 - 56 sést hvernig bilanastraumur verður 0A ef kerfið er 100% samstillt [6].

$$I_f = -I_a - I_b + \frac{V_{cn}}{jX_L} \quad (55)$$

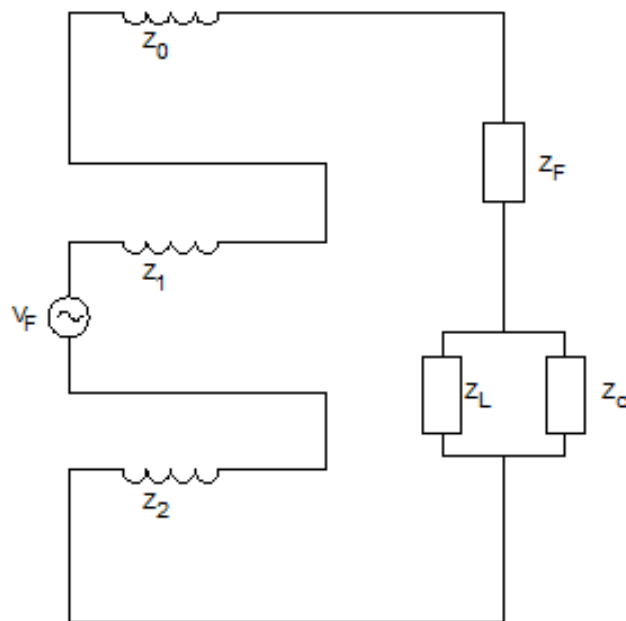
$$I_f = 0 \quad \text{Ef} \quad \frac{V_{cn}}{jX_L} = I_a + I_b \quad (56)$$

Í köflum 4.2.1 og 5.1.1 var farið í útreikninga á ein-fasa bilun í jarðbundnum og fljótandi kerfum. Í þeim köflum voru sýndar myndir af fylgdarkerfum og hvernig þau eru tengd saman við ein-fasa bilun. á mynd 51 hér fyrir neðan má sjá hvernig fylgdar kerfin væru í



Mynd 50: Ein-fasa bilun í Kerfi jarðtengt í gegnum Petersen spólu [6, Bls.7]

Petersen spólu kerfi. Á myndinni sést að Z_L og Z_c eru hliðtengd og bilunarstraumur ræðst á sambandinu milli þeirra. Ef span spólunar er jafnt rýmd í kerfinu verður straumurinn nánast 0 A.

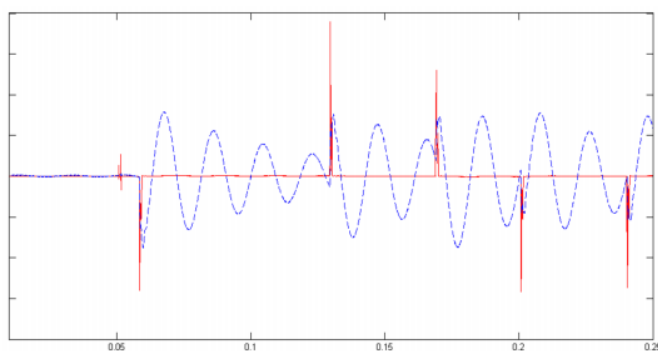


Mynd 51: Fylgdar kerfi í Petersen spólu kerfi [6, Bls.7]

5.3.1 Jarðhlaupsvarnir í kerfum jarðtengdum í gegnum Petersen spólu

Kerfi sem eru jarðtengd í gegnum hátt viðnám eða Petersen spólu haga sér svipað og fljótandi kerfi og því er hægt að nota þær varnaraðferðir sem notaðar eru fyrir fljótandi kerfi. Einnig er hægt að notast við varnaraðferð sem kallast „wattmetric“. Í þeirri aðferð er notast við núll fylgdarhluta kerfisins. Skoðað er hvort núllfylgdar afl sé að fara í framátt eða í hina áttina. Ef það er að fara í framátt er bilun á þeim útgangi ef ekki er bilun öðrum útgangi. Til þess að mæla aflið er notast við summustraum og spennu í staðinn fyrir núll fylgdarhluta. Útkoman verður því níu sinnum stærri en núll fylgdarhlutinn því summuspennan og straumurinn er þrisvar sinnum núll fylgdargildin. Þessi aðferð er mjög lík aðferðinni sem fjallað var um hér að ofan í kaflanum um jarðhlaupsvarnir í fljótandi kerfum. Munurinn er sá að þar er aflið ekki skoðað heldur fashornið á milli núll-fylgdar, spennu og straums [4].

Slitróttar jarðhlaupsbilanir er sérstök gerð af ein-fasa bilunum sem verða sérstaklega í jöfnuðum kerfum með jarðstrengjum. Einangrun í strengjunum getur orðið fyrir skemmdum vegna straumtoppa á I_0 og tíða breytinga á V_0 . Það sem veldur þessu er vatn sem veldur leiðni milli leiðara og jarðar. Þetta getur einkennst af tíðum bilunum á einangrun vegna minnkandi spennuþols í einangrun. Vegna tíða púlsa getur summuspennan verið stöðugt há. Á mynd 52 sést línurit af slitróttri jarðhlaupsbilun [10].



Mynd 52: Slitrótt jarðhlaupsbilun [10, Bls.103]

Oft er summuspennan notuð til þessa að verja útganga. Vegna þess að summuspennan er há getur sú vörn unnið á undan slitróttu jarðhlaupsvörninni. Því þarf að stilla varnirnar vel. Slitróttu jarðhlaupsvörnina er hægt að stilla svo að hún vinni fram á við eða til baka [10].

Vörnin vinnur með þeim hætti að ef hún nemur straumtopp fer ákveðinn tími í gang

og hún heldur áfram að nema og telja straumtoppana. Ef ákveðinn fjöldi toppa finnast á þessum ákveðna tíma fer vörnin í viðbragsstöðu og heldur þeirri stöðu meðan hún nemur toppa. Ef vörnin nemur straumtopp eftir ákveðna tímaseinkunn gefur hún merki um að rjúfa viðkomandi útgangi [10].

6 Niðurstöður

Aðalkostir jarðbundinna dreifikerfa er að sé slíkt kerfi notað lágmarkast spennu- og hita-álag á búnað, stuðlar að persónulegu öryggi og auðveldar greiningu á bilun því bilanastraumur verður mikill og því auðvelt fyrir varnarliðana að nema bilunina. Þá er hægt að staðsetja bilunina nokkuð nákvæmlega og valvísi á varnarbúnaði auðveld. Gallar við jarðbundin kerfi eru helst vegna hás bilanastraums verður spennuhækkun á jarðskauti og því verða jarðskaut að vera mjög góð svo spennuhækkun verði ekki of mikil. Á sumum stöðum getur verið erfitt að ná góðum jarðskautum. Kerfi slá út þó svo að um tímabundna bilun sé að ræða og því eru óþarfa útleysingar tíðar. Þó svo álag vegna hárrar spennu minnki eykur hár bilanastraumur álag á búnað.

Kostir við fljótandi kerfi eru helst að þegar ein-fasa bilun verður í fljótandi kerfi verður í raun ekki skammhlaup þar sem straumurinn getur ekki farið neitt nema í gegnum rýmd kerfisins og því verður bilanastraumur lágur og þar af leiðandi minna álag á búnað. Í jarðbundnum kerfum verður spennuhækkun á jarðskauti og ef hún verður of há er ein af lausnum við því notkun fljótandi kerfis. Þar sem bilanastraumur verður minni er það minna högg á kerfið og möguleiki að halda kerfinu í rekstri þar sem spennuþríhyrningurinn heldur sér. Það skiptir miklu máli hvernig kerfið er byggt upp. Hvort það séu einungis loftlínur eða hvort það séu mestmegnis jarðstrengir. Bilanastraumur verður hærri ef mikið er af jarðstrengjum þar sem rýmdin í kerfinu er mun meiri þegar jarðstrengir eru notaðir. Gallinn við fljótandi kerfi eru að við ein-fasa bilun hækkar spennan á hinum fösunum sem nemur margfeldinu á $\sqrt{3}$ sem getur valdið bilun á einangrun annarsstaðar í kerfinu sem getur komið fram seinna ef einangrun milli fasa og jarðar er ekki nægjanleg. Því þarf að byggja kerfi upp svo að einangrun milli fasa og jarðar þoli fasa-fasa spennuna í kerfinu. Varnarliðar fyrir fljótandi kerfi eru öðruvísi og því þarf að kaupa liða sem gefa möguleika á hvoru tveggja eða séstaka liða eða viðbætur við liða sem bjóða uppá varnir fyrir fljótandi kerfi. Erfitt er að staðsetja bilunina nákvæmlega í þeim tilfellum.

Kerfi sem eru jarðbundin í gegnum Petersen spólu geta minnkað bilanastraum mjög mikið ef þau eru rétt jöfnuð. Ef ástæðan fyrir því að færa kerfi frá því að vera jarðbundin yfir í að vera fljótandi sé að minnka bilanastraum og kerfi eru með mikið af jarðstrengjum gæti verið ástæða til þess að skoða að breyta útfærslu á kerfinu yfir í Petersen spólu kerfi. Þar sem það gæti minnkað bilanastrauminn töluvert frá fljótandi kerfi. Gallinn við Petersen spólu kerfið er að Petersen spólan er auka búnaður sem þarf að koma upp og hún þarf að vera stýranleg svo kerfið geti haldist jafnað við hvaða aðstæður sem er.

Jarðhlaupsvarnir fyrir fljótandi kerfi eru til og bæði er hægt að nota einungis núll spennufylgd eða bæði núll spennufylgd og núll straumfylgd til þess að greina ein-fasa bilanir. Það fer eftir því hvort valvísí þarf að vera góð eða ekki. Ef einungis er ein lína frá spennu eða rafala er nóg að nota núll spennufylgd til að greina ein-fasa bilanir en ef það eru margar línur og valvísí þarf að vera góð er ekki hægt að notast einungis við núll spennufylgd því hún kemur fram í öllu kerfinu en ekki bara á línunni sem er biluð. Þegar valvísí þarf að vera góð er notast við núll-spennu fylgd og núll-straumfylgd og fashornið þar á milli, þá fæst góð valvísí.

Það eru bæði kostir og gallar við bæði kerfin. Það sem er gott í öðru kerfinu er ekki eins gott í hinu kerfinu og öfugt. Vitað var fyrir að lítið mál væri að verja jarðbundin kerfi fyrir ein-fasa bilun. Í ljós kom að ekki er flókið að verja fljótandi kerfi fyrir ein-fasa bilunum heldur og allur búnaður sem þarf til þess er í boði hjá flestum framleiðendum og því eru fljótandi kerfi fýsilegur kostur. Það á sérstaklega við ef ekki er hægt að notast við jarðbundin kerfi t.d ef jarðskaut eru ekki nógu góð eða skammtímabilanir eru tíðar og ekki hægt að komast hjá þeim. En auðvitað er best að finna hvers vegna tíðar bilanir eru og laga kerfið svo bilanirnar séu ekki svona tíðar.

7 Heimildir

- [1] T. Wildi, *Electrical machines, drives, and power systems*. 6.útg. New Jersey: Charles E. Stewart, jr, 2006.
- [2] Kristinn Sigurjónsson, “Skammhlaupsglósur.” óútgefid.
- [3] J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma og Thomas J. Overbye, *Power system analysis and design*. 5. útg. Stamford: Global engineering: Christopher M. Shortt, 2012.
- [4] Michael Bamber, Michael Berstrom, Andrew Darby, Susan Darby, Graham Elliott, Peter Harding, Graeme Lloyd, Alan Marshall, Allen Millard, Andrew Myatt, Philip Newman, Anthony Perks, Steve Pickering, Stephen Potts, Simon Richards, Jack Royle, Peter Rush, Brendan Smith, Mark Stockton, Paul Wilkinson, Alan Wixon og John Wright, *Network protection and automation guide: Protective relays, measurement & control*. Levallois-Perret: Alstom Grid, 2011.
- [5] J. Lewis Blackburn og Thomas J. Domin,, *Protective Relaying Principles and Applications*. 3.útg. Pensacola: Taylor & Francis Group, 2007.
- [6] J. Roberts, Dr. H. J. Altuve og Dr. D. Hou, *Review of ground fault protection method for grounded, ungrounded, and compensated distribution systems*. Pullman: Schweitzer engineering laboratories, 2001.
- [7] D. Whitehead, og N. Fisher, “Advanced commercial power system protection practices applied to naval medium voltage power system.” Í Electric ship technologies symposium, bls. 444-450, 2005.
- [8] Steingrímur Jónsson, “Munnleg heimild.” tölvupóstur, nóvember 2013.
- [9] X. Yang, M. Choi, S. Lee, I. Lim, og S. Lim, “Ungrounded system fault section detection method by comparison phase angle of zero sequence current.” *Journal of electrical engineering and technology*, árg.3, töl.4, bls.484-490, 2008.
- [10] ABB, Vaasa, Finnland, *Application manual feeder protection relay REF615*, 1999.
- [11] H. Saadat, *Power system analysis*. New York: McGraw-Hill, 1999.

- [12] “Raforkukerfid.” Landsnet [rafrænt] Af:[http://www.landsnet.is/raforkukerfid/ flutningskerfilandsnets/](http://www.landsnet.is/raforkukerfid/flutningskerfilandsnets/) [Sótt: 10.10.2013].
- [13] “Verklýsing: Sérstök ákvadi um spennistöðvar og dreifikerfi í strjálbýli.” (2011, 1. mars). Mannvirkjastofnun. Reykjavík. [rafrænt] af:<http://www.mannvirkjastofnun.is/library/Skrar/Rafmagnsoryggissvid/Verklysingar/Rafveitur/VL3%200311.pdf> [Sótt 08.11.2013].
- [14] “Raidk, raidg, rapdk and racik: Phase overcurrent and earth-fault protection assemblies based on single phase measuring elements.” (1999).Vesteras, Sviþjóð [Rafrænt] Af: [http://www05.abb.com/global/scot/scot354.nsf/veritydisplay/f06ad2a2bf0eb217c12578570041df31/\\$file/1MRK509031-UEN_1_en_User_s_Guide_RAIDK__RAIDG__RAPDK_and_RACIK_Phase_overcurrent_and_earth-fault_protection_assemblies.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot354.nsf/veritydisplay/f06ad2a2bf0eb217c12578570041df31/$file/1MRK509031-UEN_1_en_User_s_Guide_RAIDK__RAIDG__RAPDK_and_RACIK_Phase_overcurrent_and_earth-fault_protection_assemblies.pdf) [Sótt 08.11.2013].
- [15] “Reglugerð um gæði raforku og afhendingaröryggi.” NR. 1048/2004.

Viðaukar

Viðauki A

Fault type	Positive sequence	Negative sequence	Zero sequence	Fault currents
<i>a,b,c</i>				
<i>a,b</i>				
<i>b,c</i>				
<i>c,a</i>				
<i>a,b,G</i>				
<i>b,c,G</i>				
<i>c,a,G</i>				
<i>a,G</i>				
<i>b,G</i>				
<i>c,G</i>				

Mynd 53: Straumfylgdarkerfi með tilliti til bilana [5]

Fault type	Positive sequence	Negative sequence	Zero sequence	Fault voltages
a,b,c				Zero at fault
a,b				
b,c				
c,a				
a,b,G				
b,c,G				
c,a,G				
a,G				
b,G				
c,G				

Mynd 54: Spennufylgdarkerfi með tilliti til bilana [5]