

Jarðstrengslengdir í meginflutningskerfinu

Mat á mögulegum jarðstrengslengdum í nýju 220 kV
flutningskerfi á Norðurlandi
Kerfisgreining

Jarðstrengslengdir í meginflutningskerfinu

Mat á mögulegum jarðstrengslengdum
í nýju flutningskerfi á Norðurlandi

Kerfisgreining

Efnisyfirlit

1	Inngangur og samantekt	5
1.1	Inngangur og markmið	5
1.2	Forsendur.....	5
1.3	Samantekt	6
2	Forsendur greiningar og viðmið.....	8
3	Kröflulína 3 (KR3)	10
3.1	Launafslúttjöfnun – Afþléðigreining - PSS®E.....	11
3.2	Stöðugleiki og spennuprep – Greining á kvikri hegðun - PSS®E	12
3.3	Helstu niðurstöður	14
3.4	Greining á svipulli svörun – PSCAD	15
3.4.1	Uppsetning grunnkerfis fyrir greiningu	15
3.4.2	Yfirtónagreining.....	17
3.4.3	Spennusetning KR3	20
3.4.4	Tímabundnar yfirspennur (e. Temporary Overvoltage)	27
3.4.5	Niðurstöður svipulla athugana fyrir KR3.....	33
4	Blöndulína 3 (BL3).....	34
4.1	Launafslúttjöfnun – Afþléðigreining - PSS®E.....	35
4.2	Stöðugleiki og spennuprep – Greining á kvikri hegðun - PSS®E	35
4.3	Helstu niðurstöður	38
4.4	Greining á svipulli svörun – PSCAD	39
4.4.1	Spennusetning Blöndulínu 3.....	39
4.4.2	Truflun við Rangárvelli	45
4.4.3	Niðurstöður svipullar greiningar.....	46
5	Hólasandslína 3 (HS3)	47
5.1	Launafslúttjöfnun – Afþléðigreining - PSS®E.....	48
5.2	Stöðugleiki og spennuprep – Greining á kvikri hegðun - PSS®E	48
5.3	Greining á svipulli svörun – PSCAD	51
5.3.1	Spennusetning Hólasandslínu 3	51
5.3.2	Truflun við Rangárvelli	57
5.3.3	Niðurstöður svipullar greiningar.....	57
6	Hólasandslína 3 (HS3), Kröflulína 3 (KR3) og Blöndulína 3 (BL3)	58
6.1	Stöðugleiki og spennuprep – Greining á kvikri hegðun – PSS®E.....	60
6.1.1	Spennusetning á flutningslínunum, með jarðstreng að hluta til	60
6.1.2	Spennusetning á flutningslínunum – Loftlínur alla leið.....	62
6.2	Greining á svipulli svörun – PSCAD	65

6.2.1	Samanburður á tíðnirófi loftlínukerfis og jarðstrengskerfis	65
6.2.2	Svipul svörun kerfisins við truflun á 220 kV teini á Rangárvöllum	70
6.2.3	Spennusetning BL3	72
6.2.4	Niðurstöður svipullar greiningar.....	74
7	Niðurstaða verkefnisins	76
8	Heimildaskrá.....	78
A.	Viðauki – Útjöfnunarpörf launafis í jarðstrengjum	79
B.	Viðauki – Útskýring á „zero-miss“	80
B.1.	Hvað er zero-miss?	80

1 Inngangur og samantekt

1.1 Inngangur og markmið

Í Kerfisáætlun Landsnets eru settar fram tvær meginleiðir til uppbyggingar meginflutningskerfisins; byggðalínuleið og hálendisleið. Báðar miðast við að uppbygging verði að mestu með loftlínunum.

Markmiðið með þessu verkefni er að greina mögulegt umfang jarðstrengslagna í nýju 220 kV flutningskerfi á Norður- og Norðausturlandi. Ekki er um hönnunarskýrslu að ræða og tekið skal fram að við nánari verkhönnun einstakra framkvæmda má gera ráð fyrir því að þær strenglengdir, sem settar eru fram hér, taki einhverjum breytingum.

Í þessari skýrslu er gerð grein fyrir athugunum vegna fyrirhugaðs 220 kV flutningskerfis á Norðurlandi milli Blöndu og Fljótsdals.

Valdir eru ákveðnir kaflar í nýju 220 kV flutningskerfi og loftlínu skipt út fyrir jarðstreng. Skoðuð eru raffræðileg áhrif mismunandi jarðstrengslengda í hverri línu fyrir sig og einnig samverkandi áhrif, þ.e. hvaða áhrif jarðstrengslögn í einni línu hefur á mögulega lengd jarðstrengs í annarri línu. Með hefðbundnum aflflæðiútreikningum er gróft efra mat á lengd strengja fundið og sú niðurstaða greind nánar með svipulum reikniaðferðum. Í öllum tilvikum er gert ráð fyrir því að núverandi 132 kV byggðalína sé áfram í rekstri.

Greiningin er framkvæmd í tveimur þrepum. Í fyrra þrepinu er beitt aflflæðiútreikningum og hermunum á kvikri („dýnamískri“) hegðun kerfisins með kerfislíkani Landsnets í hermiforritinu PSS@E. Þessir útreikningar eru grunnurinn að mati á mögulegri hámarkslengd jarðstrengshluta viðkomandi línu. Til þess að fá skýrari mynd af svipulli (e. transient) hegðun kerfisins með þeirri hámarkslengd jarðstrengs er þörf á nánari greiningum, þ.e. þrepi tvö. Hermanir í PSS@E gefa til að mynda engar upplýsingar um svipular yfirspennur, innhlaupsstrauma (e. in-rush currents), t.d. við spennusetningu, svo eitthvað sé nefnt. Til þess að herma þessi atriði hefur verið sett upp afmarkað kerfislíkan í hermiforritinu PSCAD.

1.2 Forsendur

Til þess að meta hámarkslengd strenghluta er stuðst við eftirfarandi forsendur:

- (i) Launaflsútfjöfnun sé ekki meiri en sem nemur 50% af launaflsframleiðslu jarðstrengs. Þetta er gert til þess að minnka hættu á „zero-miss“ (sjá nánar í Viðauka B).
Útfjöfnunarpörfin er mest við spennusetningu strengs og miðast þá við það að halda spennu innan viðmiðunarmarka (sjá næsta punkt).
- (ii) Sístæð spenna í rekstri og við opinn enda línu, þegar hún hefur verið spennuset, fari aldrei meira en 10% yfir málgildi í samræmi við hönnunarviðmið flutningskerfisins og ákvæði reglugerðar um gæði raforku og afhendingaröryggi, nr. 1048/2004.
Jafnframt er þessi forsenda í samræmi við leiðbeiningar CIGRÉ varðandi útreikninga á útfjöfnunarpörf [1].
- (iii) Spennuþrep (við innsetningu eða frátengingu), sem notandi verður fyrir, verði ekki meira en 5% í samræmi við reglugerð nr. 1048/2004 um gæði og afhendingaröryggi raforku, sem Landsneti ber að hlíta.
- (iv) Undirsegulmögnun nálægra vinnslueininga ekki ofnýtt.

Með undirsegulmögnun vinnslueininga er átt við þau rekstrartilvik þegar vinnslueining þarf að taka til sín („gleypa“) launafl til þess að halda niðri spennunni. Mikil, viðvarandi undirsegulmögnun vinnslueininga getur leitt til hitamyndunar og útleysinga véla. Hversu mikla undirsegulmögnun vinnslueiningar ráða við og hversu lengi í senn er þó afar misjafnt og ræðst af hönnun viðkomandi einingar. Undirsegulmagnaðar vélar hafa jafnframt takmarkaða getu til að taka þátt í reglun á spennu við truflanir. Því er aukin hætta á frekari útleysingum við truflanir.

Varðandi viðmið um flutningsþörf í nýju 220 kV flutningskerfi er miðað við 550 MVA, eins og gert er ráð fyrir í forsendum Kerfisáætlunar Landsnets 2015 – 2024. Til þess að uppfylla þau viðmið er hér reiknað með tveimur settum af 1200 mm² Al-strengjum. Flutningsgetan er um 600 MVA miðað við algengar íslenskar aðstæður, svo flutningsþörfinni er fullnægt.

Gert er ráð fyrir því að bæði strengsettin séu spennusettt samtímis. Ekki er gert ráð fyrir því að settir séu aflrofar þar sem strengur og loftlína mætast, enda myndi það kalla á byggingu tengivirkis.

Lögð er áhersla á það að hér er einungis að ræða raffræðilega greiningu á lagningu jarðstrengja – landfræðilegar aðstæður og nákvæm lega línu/strengs eru ekki greindar.

Við rannsóknir á svipulli svörun er einkum horft til eftirfarandi:

- (i) Áhrif jarðstrengja á yfirtíðniróf.
- (ii) Mögnun á yfirtónum í tengipunktum.
- (iii) Tímabundnar yfirspennur og dempun á þeim.
- (iv) Innhleyppistrauma við spennusetningu.

1.3 Samantekt

Gróft mat á mögulegum hámarks lengdum jarðstrengskafla í stökum flutningslínunum er sem hér segir:

- Blöndulína 3 (BL3): 10 km (af rúmlega 100 km), með töluverðum takmörkunum, t.a.m. vegna undirsegulmögnunar véla Blönduvirkjunar.
- Hólasandslína 3 (HS3): 12 km (af u.þ.b. 90 km); huga þarf vel að einangrunarsamhæfni búnaðar.
- Kröflulína 3 (KR3): 15 km (af u.þ.b. 120 km).

Nánari greiningar á tímabundnum yfirspennum gefa til kynna að þessir jarðstrengskaflar hafi í för með sér rekstrarlegar áskoranir í ósamtengdu kerfi, sér í lagi við truflanir nálægt tengivirkjum Landsnets. Fyrir jarðstrengskafla í HS3 og BL3 eru reiknaðar meðsveiflutíðnir kerfisins nálægt öðrum og þriðja yfirtón sem m.a. getur haft í för með sér yfirspennur við spennusetningu spenna. Niðurstöður þeirra greininga eru m.a. að frekari styrkingar kerfisins séu mikilvægar forsendur fyrir því að unnt sé að leggja hluta af Blöndulínu 3 í jarðstreng.

Þegar kerfið á Norðausturlandi hefur verið samtengt (BL3, HS3 og KR3 samtengdar), með þeim strenglengdum sem að ofan greinir, er spennan á 220 kV há og kerfið viðkvæmt fyrir truflunum. Spennusetning er áskorun, sérstaklega með tilliti til spennu á Rangárvöllum. Ofangreindar strenglengdir eru of langar miðað við samtengdan rekstur þar sem launaflsframleiðsla strengja er of há miðað við skammhlaupsafl kerfisins.

Lágt skammhlaupsafl í flutningskerfinu á Norður- og Norðausturlandi er helsta orsök fyrir takmörkun á lengd jarðstrengja. Skammhlaupsafl á Rangárvöllum og í Blöndu er mjög háð tengingu við Fljótsdal og Kröflu á 220 kV. Truflun á þeirri tengingu hefur í för með sér að skammhlaupsafl hríðfellur á Rangárvöllum og í Blöndu.

Aukning á skammhlaupsafl er því mikilvæg forsenda þess að mögulegt sé að leggja strengi að einhverju marki í fyrirhugað 220 kV kerfi á Norður- og Norðausturlandi. Með samtengingu á milli landsvæða eykst skammhlaupsafl til muna.

Niðurstöður þessa verkefnis, þ.e. að jarðstrengur í einni línu hafi áhrif á mögulega lengd jarðstrengshluta í öðrum línum á sama svæði, eru í fullu samræmi við niðurstöður annarra flutningsfyrirtækja. Benda má á rannsóknir írska flutningsfyrirtækisins EirGrid, s.k. „Grid West Project“, í því sambandi [2].

2 Forsendur greiningar og viðmið

Jarðstrengir á hárrí spennu framleiða launafl sem getur hækkað spennu í kerfinu. Lagning jarðstrengja á hærri spennum kallar að jafnaði á útjöfnun launafls með spólum. Algengt er að miðað sé við að stærð spóla sé ekki meiri en svo en að þær framleiði helming launafls strengja. Þetta er gert til að tryggja að svokallað „zero miss“ eigi sér ekki stað við spennusetningu strengja. Nánar er fjallað um þetta fyrirbæri í Viðauka B ásamt leiðum til að sporna við því.

Miðað er við að spenna flutningskerfisins sé ekki hærri en 110% af nafnspennu kerfisins í sístæðu ástandi. Einnig eru spennuþrep í einstökum tengipunktum skoðuð við innsetningu strengs. Spennuþrepin verða að vera innan 5% skv. reglugerð um gæði raforku og afhendingaröryggi [3].

Í þessari athugun eru jafnframt skoðuð áhrif strengja á svipula hegðun kerfisins þar sem skoðuð eru:

- Tíðniróf kerfisins og yfirtónar
- Rofyfirspennur og -straumar
- Tímabundnar yfirspennur

Tíðniróf einstakra tengipunkta segir til um það hvernig viðnám kerfisins breytist með tíðni. Lagning jarðstrengja hefur áhrif til lækkunar á samhliða meðsvæiflutíðnum (e. parallel resonance) kerfisins. Ef slíkar tíðnir fara undir 150 Hz valda þær vandræðum við spennusetningu spenna. Miðað er við að viðmiðunarmörk samhliða meðsvæiflutíðna sé að við þær sé viðnám kerfisins í viðkomandi punkti undir 1000 Ω miðað við annan og þriðja yfirtón. Greina þarf sérstaklega þau tilvik þegar viðnámið er $\geq 1000 \Omega$. Þetta viðmið byggir á reynslu EirGrid [4].

Háð tegund álags getur það framleitt yfirtóna í kerfinu. Þessir yfirtónar ýmist magnast eða eru dempaðir í samræmi við tíðniróf þess tengipunkts sem þeir tengjast. Yfirtónar þurfa að vera innan ákveðinna marka samkvæmt reglugerð um gæði raforku [3]. Bjögun einstakra yfirtóna á spennu hærri en 200 kV skal vera að hámarki 2,0% og heildarbjögun (THD) skal ekki vera hærri en 3% 95% tímans.

Möguleg mótvægisáðgerð ef bjögun af völdum yfirtóna er mikil er að setja upp síur til þess að dempa einstaka yfirtóna. Gæta þarf að því að endurstilla slíkar síur í samræmi við þróun og uppbyggingu flutningskerfisins.

Svipular yfirspennur (rof- og tímabundnar yfirspennur) eru dempaðar yfirspennur sem vara í stuttan tíma. Búnaður er gerðarprófaður fyrir svipulum yfirspennum til þess að geta staðist þær án þess að verða fyrir bilun. Fyrir mörk svipulla yfirspenna er stuðst við viðmiðunarmörk frá EirGrid [4].

Rofyfirspenna myndast þegar rofi er opnaður eða honum lokað. Í ÍST EN 60071 [5] er stöðluð rofyfirspenna fyrir 300 kV búnað 750 kV sem er u.þ.b. 2,5 pu¹ og verður það gildi notað sem viðmiðunargildi í þessum athugunum.

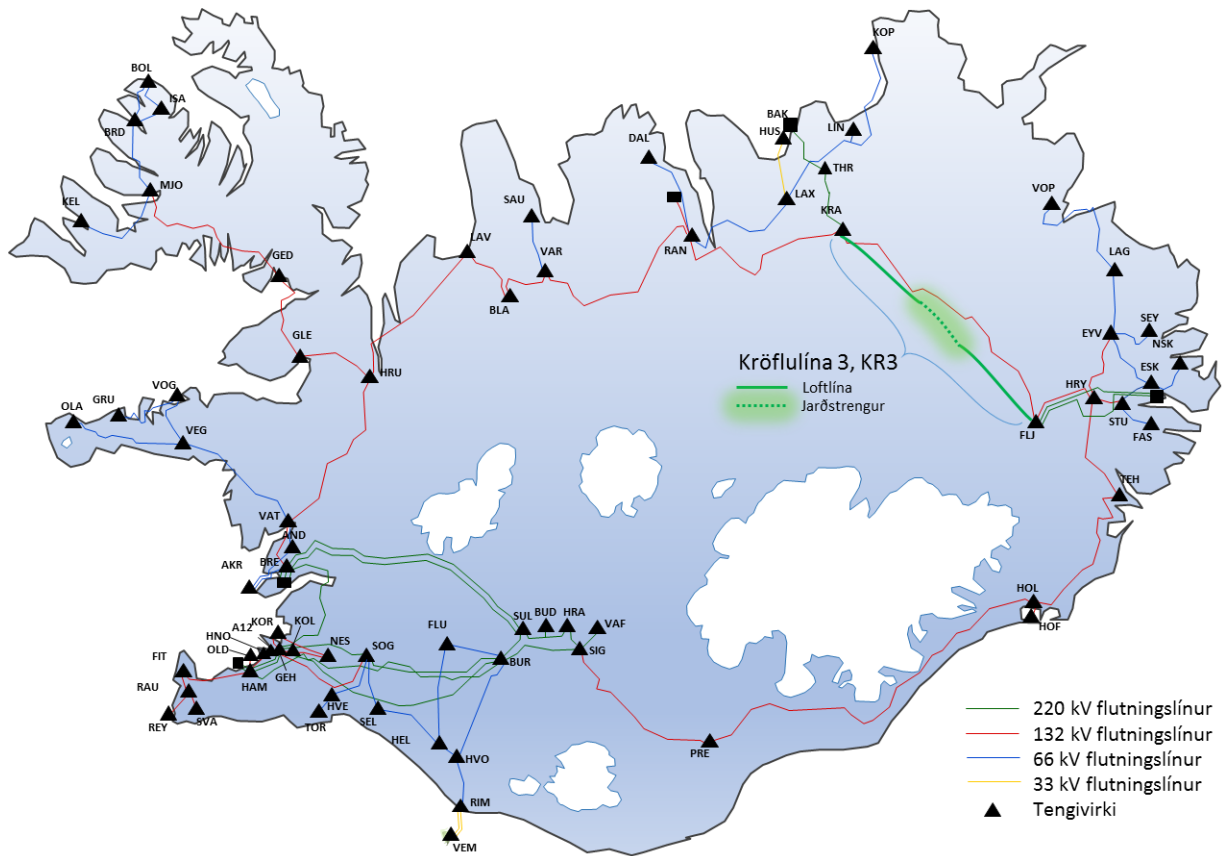
¹ per-unit (eða pu) kerfið er mælieining sem er mikið notuð í þessari skýrslu. 1 pu jafngildir málgildi viðkomandi stærðar. Sem dæmi, á 220 kV er 220 kV = 1,0 pu. 1,1 pu þýðir að viðkomandi stærð sé 10% yfir málgildi.

Þegar innhleypistraumur er skoðaður er lagt mat á hvort að mögulegt væri að nota hærri útjöfnun en 50%.

Fyrir mörk tímabundinna yfirspenna er miðað við að þær séu ekki hærri en 1,6 pu.

3 Kröflulína 3 (KR3)

Kröflulína 3 er 220 kV lína sem fyrirhugað er að byggja milli Kröflu og Fljótsdals.

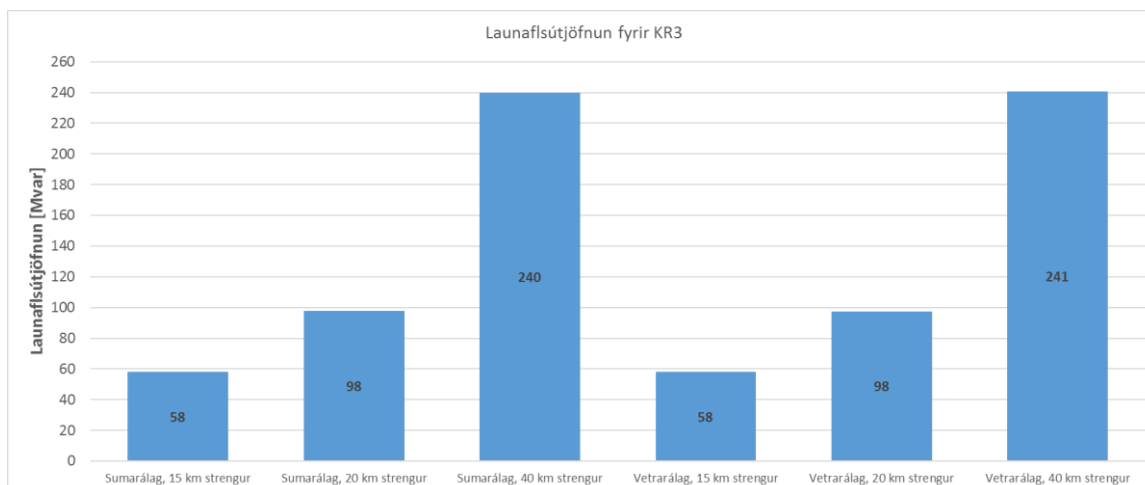


Mynd 3-1 - Flutningskerfi Landsnets, með Kröflulínu 3 teiknaða inn á

Mynd 3-1 sýnir línuna á „skematískan“ hátt. Eins og sést á myndinni er gert ráð fyrir því, í þessari greiningu, að jarðstrengskaflinn sé um miðbik línunnar.

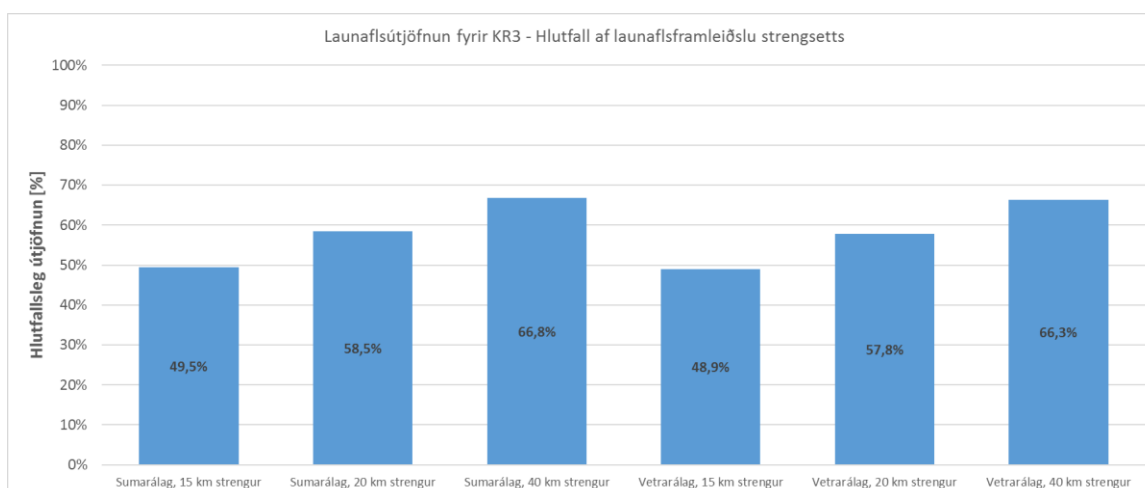
3.1 Launafslúttjófnum – Afíflæðigreining - PSS®E

Gerðar voru hermanir með þremur lengdum á jarðstrengjum fyrir Kröflulínu 3; 15 km, 20 km og 40 km, ásamt tveimur álagstílfellum, sumarálág og vetrarálág. Mynd 3-2 sýnir úttjófnumarþörf launafsl [Mvar] fyrir Kröflulínu 3 þegar miðhluti hennar er lagður í jörðu:



Mynd 3-2 – Samanburður á nauðsynlegri launafslúttjófnum sumar og vetur, 15 km, 20 km og 40 km strengur

Mynd 3-3 sýnir hlutfallslega úttjófnum fyrir tilfelli á Mynd 3-2:



Mynd 3-3 – Hlutfallsleg úttjófnum fyrir KR3

Niðurstöður sýna að hlutfallsleg úttjófnumarþörf er yfir 50% fyrir bæði 20 km og 40 km jarðstrengi. Hlutfallsleg úttjófnumarþörf fyrir 15 km langan jarðstreng er rétt undir 50%. Viðmiðið er að úttjófnumin sé ekki meiri en 50% í öllum rekstrartilvikum. Það er því einungis 15 km tilfellið sem uppfyllir það.

Fyrir 15 km langa jarðstrengi er heildar úttjófnumarþörfin rétt tæp 50%, 58-59% fyrir 20 km langa jarðstrengi og um 66-67% fyrir 40 km langa jarðstrengi. Niðurstöðurnar sýna jafnframt að úttjófnumarþörfin er að mestu óháð flæðinu um línuna, þ.e. hvort kerfið er léttlestað eða þunglestað.

3.2 Stöðugleiki og spennuþrep – Greining á kvikri hegðun - PSS®E

Til að greina áhrif þess að leggja hluta lína í jörðu var kvik hegðun flutningskerfisins greind við mismunandi aðstæður. Kerfinu er stillt upp fyrir sömu tvö álagstílfelli og í kafla 3.1, þ.e.

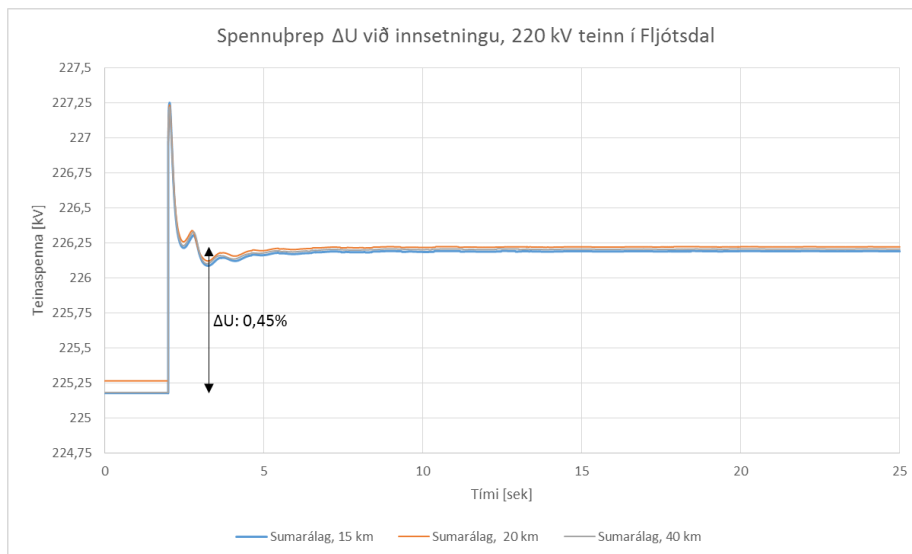
- Sumarálag, þar sem færri vinnslueiningar eru í rekstri og álag minna.
- Vetrarkerfi hins vegar þar sem álag er í hámarki hátt og fleiri vinnslueiningar inni til að anna auknu álagi.

Skoðaðar eru þrjár truflanir í kerfinu fyrir þessi tilfelli:

- Ein vél í Fljótsdal leysir út
- Teinatengi í Fljótsdal leysir út, eyjarekstur á álveri Alcoa með fimm vélum í Fljótsdalsstöð
- KR3 spennusettt frá Kröflu

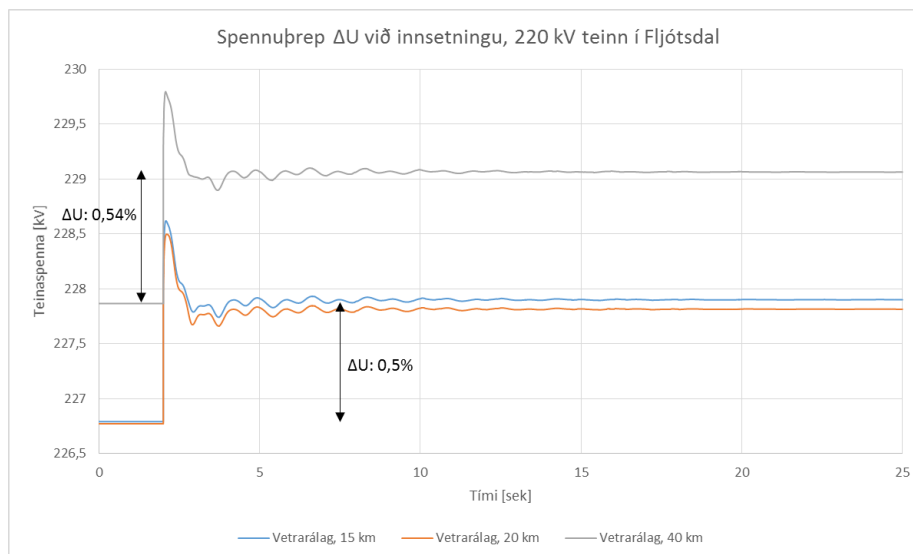
Skoðuð eru áhrif strengs á stöðugleika í kerfisins við truflanir og hvort spennuþrep, t.d. við innsetningu á loftlínum/strengjum, fari yfir viðmiðunarmörk. Einnig er áhugavert að skoða umfram launafslæði frá strengjunum sem útjöfnunarspólurnar ná ekki að jafna út.

Mestar líkur á of háu spennuþrepi eru við spennusetningu jarðstrengs þegar hann er opinn í annan endann. Mynd 3-4 sýnir spennuþrep sem notendur geta orðið fyrir við innsetningu á KR3 við sumarálag:



Mynd 3-4 – Spennuþrep við innsetningu KR3, sumarálag

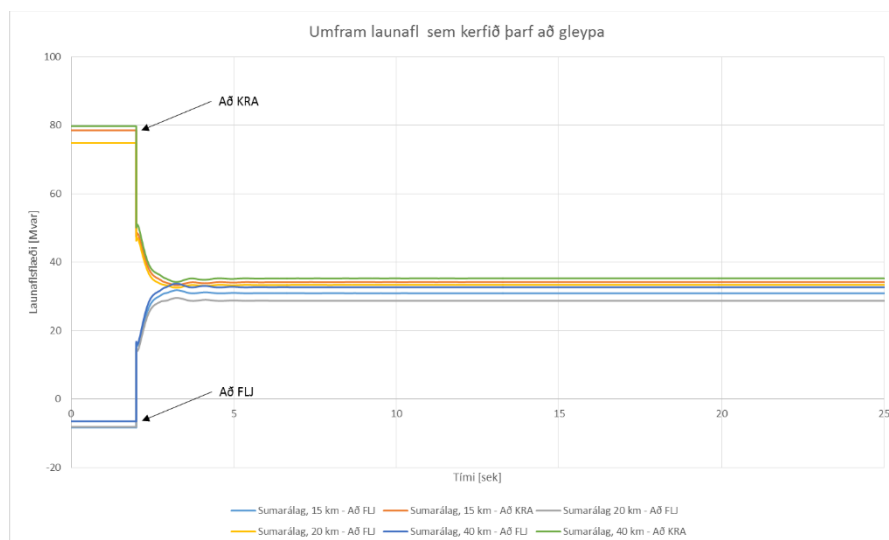
Mynd 3-5 sýnir spennuþrep sem notendur geta orðið fyrir við innsetningu á KR3 við vetrarálag:



Mynd 3-5 - Spennuþrep við innsetningu KR3, vetrarálag við tein í Fljótsdal

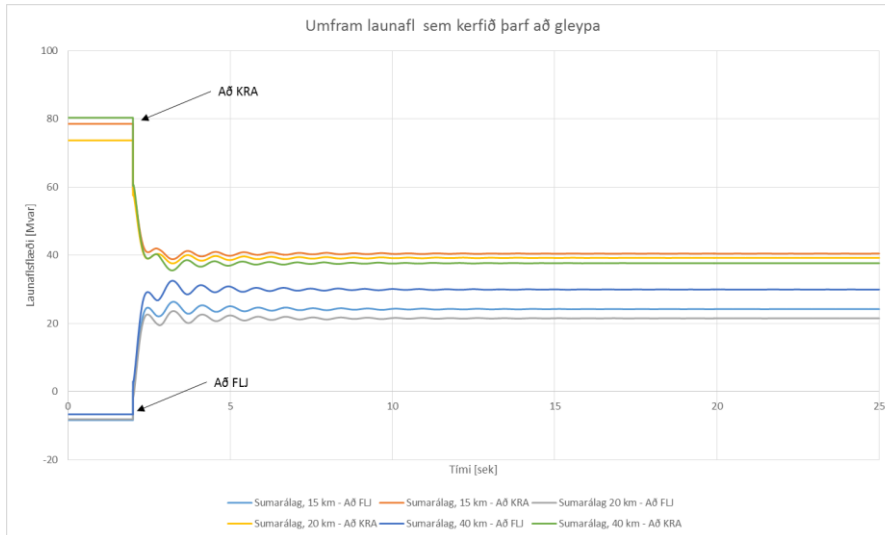
Niðurstöður sýna að spennuþrepið sem notendur tengdir byggðalínunni gætu orðið fyrir er 0,4-0,6% og því innan marka (5%).

Mynd 3-6 sýnir það launafl sem útfjöfnunarspólurnar ná ekki að jafna út og kerfið þarf að taka við, miðað við sumarálág í kerfinu.



Mynd 3-6 -Launafl sem kerfið þarf að taka við frá jarðstrengjum, sumarálág

Mynd 3-7 sýnir það sama og Mynd 3-6, en miðað við vetrarálag í kerfinu.



Mynd 3-7 - Launafi sem kerfið þarf að taka við frá jarðstrengjum, vetrarálag

Niðurstöður á Mynd 3-6 og Mynd 3-7 sýna að vélar í Kröflu jafna út umfram launafi sem strengirnir framleiða, um 80 Mvar, áður en rofanum er lokað. Við lokun rofans Fljótisdalsmegin á Kröflulínu 3 jafnast launafliæði út. Launafliæði út á byggðalínuna er það sama í öllum tilfellum, þ.e. fyrir 15, 20 og 40 km strengi en það skýrist af því að hlutfallsleg útfjöfnun er sú sama fyrir öll þrjú tilfelli og því ætti umfram launafi sem nálægar vélar í kerfinu þurfa að gleypa að vera svipað hvort sem um 15 km eða 40 km streng er að ræða.

3.3 Helstu niðurstöður

Nauðsynleg launafliútfjöfnun fyrir 15 km langa jarðstrengi er rétt undir 50% viðmiðinu sem þýðir að mögulegt er að reka um 15 km jarðstreng sem hluta af Kröflulínu 3. Nauðsynleg launafliútfjöfnun er yfir 50% viðmiðinu fyrir bæði 20 km- og 40 km jarðstrengi og því ekki talið mögulegt að hafa svo langa jarðstrengi sem hluta af Kröflulínu 3, miðað við forsendur greiningarinnar.

Niðurstöður úr greiningum á kvikri hegðun kerfisins sýna að spennuþrep í opna endanum á Kröflulínu 3 getur orðið allt að 7% við spennusetningu línunnar. Spennuþrepið sem notendur geta orðið fyrir er um 0,4-0,6% (sjá Mynd 3-4 og Mynd 3-5) sem er langt innan marka.

Út frá þessum niðurstöðum má áætla að hámarkslengd jarðstrengskafla í Kröflulínu 3, miðað við gefnar forsendur, sé um 15 km. Nauðsynleg launafliútfjöfnun er um 60 Mvar.

Þessi lengd og útfjöfnun eru grunnurinn að greiningum á svipulli svörun, sem fjallað er um í næsta kafla.

3.4 Greining á svipulli svörun – PSCAD

Eftirfarandi athuganir eru gerðar í PSCAD fyrir Kröflulínu 3:

- Yfirtónagreining (eða tíðnirófsgreining) frá tein 220 kV tengivirkis Kröflu og í Fljótsdal miðað við óskert kerfi og miðað við versta truflanatilvik þar sem KR3 er í rekstri
- Spennusetning línunnar frá Kröflu með opinn enda við Fljótsdal
- Spennusetning línunnar frá Fljótsdal með opinn enda við Kröflu
- Tímabundnar yfirspennur við þriggja fasa truflun nálægt Kröflu og í Fljótsdal

3.4.1 Uppsetning grunnkerfis fyrir greiningu

Grunnkerfi var stillt upp í PSCAD byggt á niðurstöðum skammhlaups- og álagsflæðiútreikninga úr PSS®E. Grunnkerfið miðar við að KR3 sé loftlína og var samanburður gerður á milli PSCAD og PSS®E fyrir það kerfi. Þar sem strenggögn notuð í PSS®E eru fengin úr PSCAD er gert ráð fyrir að niðurstöðurnar séu sambærilegar. Reiknað var skammhlaupsframlag véla í þeistareykjavirkjun og Fljótsdalsvirkjun. Einnig var tekið tillit til skammhlaupsframlags 132 kV kerfisins. Út frá skammhlaupsframlagi voru eiginleikar jafngildisspennulinda ákveðnir í PSCAD.

Skammhlaupsstraumar 220 kV teina í PSCAD voru bornir saman við niðurstöður úr PSS®E (Tafla 3-1) til þess að sannreyna PSCAD-líkanið. Munurinn reyndist vera á bilinu 2 - 6%.

Tafla 3-1 – Samanburður á skammhlaupsstraumum teina í PSS®E og PSCAD fyrir 220 kV frá Kröflu að Fljótsdal

Teinn nr.	Heiti teins	Spenna	PSS®E	PSCAD	Munur
		[kV]	ik" [A]	ik" [A]	Δ /PSS®E
4095	Bakki	220	2477	2331	6%
40601	KRA_220KV	220	3908	3691	6%
4090	THEISTAR	220	3216	3071	4%
5060	FLJ_220_A	220	8411	8589	2%

Horn og spenna teina í PSS®E var notuð til að ákvarða upphafsgildi spennulinda í PSCAD. Samanburður á spennu teina í PSCAD og PSS®E má sjá í töflu Tafla 3-2.

Tafla 3-2 – Samanburður á spennu teina í PSS®E og PSCAD fyrir 220 kV frá Kröflu að Fljótsdal

Teinn nr.	Heiti teins	PSS®E	PSCAD	Munur
		spenna [pu]	spenna [pu]	Δ /PSS®E
4095	Bakki	1,0406	1,0403	0,03%
40601	KRA_220KV	1,0442	1,046	0,17%
4090	THEISTAR	1,0433	1,045	0,16%
5060	FLJ_220_A	1,0449	1,046	0,11%

Flæði inn á 220 kV teina líkana í PSS®E og PSCAD má sjá í 3-3. Í flestum tilfellum er munur á flæði undir 6%. Hlutfallslegur munur verður mikill þar sem flutningur er lítill eins og frá Kröflu (40601) að Þeistareykjum (4090).

Tafla 3-3 – Samanburður á flæði milli teina í PSS®E og PSCAD fyrir 220 kV kerfi frá Kröflu að Fljótsdal. Neikvætt formerki á flæði afls táknað flæði að teini og jákvætt formerki á flæði frá tein.

Teinn	Frá	PSS®E		PSCAD		Raunafli munur	Launafli munur
		Raunafli [MW]	Launafli [Mvar]	Raunafli [MW]	Launafli [Mvar]	Δ /PSS®E	Δ /PSS®E
4090	4095	52,1	7,1	52,6	7,4	1%	4%
4090	Vel 1	-44,8	-2	-47,4	-2,3	-6%	-16%
4090	Vel 2	-10	-5,5	-12,3	-0,1	-23%	-99%
4090	40601	2,8	0,5	7,1	1,1	153%	114%
40601	4090	-2,8	-5,2	-7,1	-5,8	-152%	-11%
40601	spennir	-4,6	16,2	-6,5	16,3	-42%	1%
40601	5060	7,3	-11	10,2	-10,6	40%	-4%
5060	50701	284,2	-18,1	290,9	-18,3	2%	-1%
5060	50702	276	-18,5	271,1	-17,7	2%	-4%
5060	Vel 1	-95,7	14,1	-95,6	12,9	0%	8%
5060	Vel 2	-95,7	14	-95,6	12,9	0%	8%
5060	Vel 3	-95,5	14	-95,6	12,9	0%	8%
5060	Vel 4	-67,4	11	-67,3	14,9	0%	36%
5060	Vel 5	-95,6	14	-95,5	14,9	0%	7%
5060	Vel 6	-95,7	14	-95,6	14,9	0%	7%
5060	132 kV spennar	7,8	38	7,5	37,5	3%	1%

Fyrir forathugunarstig, eins og hér er unnið á, er það metið svo að munur á niðurstöðum úr PSS®E og PSCAD (þ.e. munur á skammhlaupsstraumum, spennum og aflflæði) sé innan ásættanlegra marka.

Tíðniháð líkan er notað fyrir strengi og loftlínur í þeim línuköflum sem eru skoðaðir hverju sinni, í samræmi við leiðbeiningar frá Cigre fyrir strengi á hærri spennu [1]. Tíðniháð líkan gefur réttari mynd af hegðun strengja og loftlína á hærri tíðnum.

3.4.2 Yfirtónagreining

Í yfirtónagreiningum er tíðniróf kerfisins skoðað frá ákveðnum teini. Talsverður munur getur verið á yfirtíðnirófi teina kerfisins þar sem nærliggjandi línur og spennar hafa mikil áhrif.

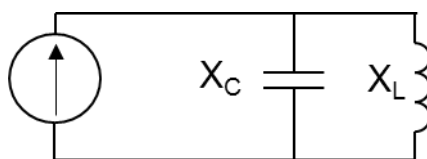
Helsta markmið yfirtónagreininga er að finna samhliða- og raðmeðsveiflutíðni (e. parallel and series resonance) kerfisins. Jafnframt er reiknað út samviðnám kerfisins á þessum tíðnum.

Yfirtónar í kerfinu geta örvað þessar tíðnir með þeirri afleiðingu að spenna þjagast eða tímabundnar yfirspennur myndast.

Samviðnám samhliða- og raðmeðsveiflutíðna má útskýra á einfaldan hátt með Mynd 3-8 og Mynd 3-9. Mynd 3-8 sýnir jöfnur viðnáms samhliða sveiflutíðni spólu (L) og rýmdar (C) án tapa. Við ákveðna tíðni (ω) er launviðnám spólu ($X_L = j\omega L$) og rýmdar ($X_C = \frac{-j}{\omega C}$) það sama. Við þá tíðni nálgast nefnari samviðnámsins núll og því verður samviðnámið mjög stórt. Fyrir samviðnám raðtengdrar meðsveiflutíðni (Mynd 3-9) verður teljari núll þegar launviðnám spólu og rýmdar er það sama við ákveðna tíðni og samviðnám verður mjög lítið.

$$X_s = \frac{X_L * X_C}{X_L + X_C}$$

Mynd 3-8 - Einföld

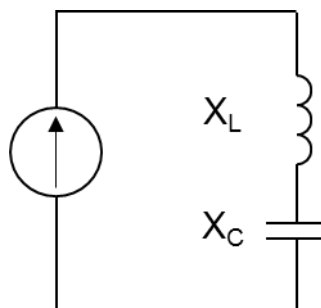


meðsveiflutíðnir

skýringarmynd fyrir samhliða

$$X_r = X_L + X_C$$

$$Ef X_C = -X_L \Rightarrow X_r \approx 0$$



Mynd 3-9 - Einföld skýringarmynd fyrir raðtengdar meðsveiflutíðnir

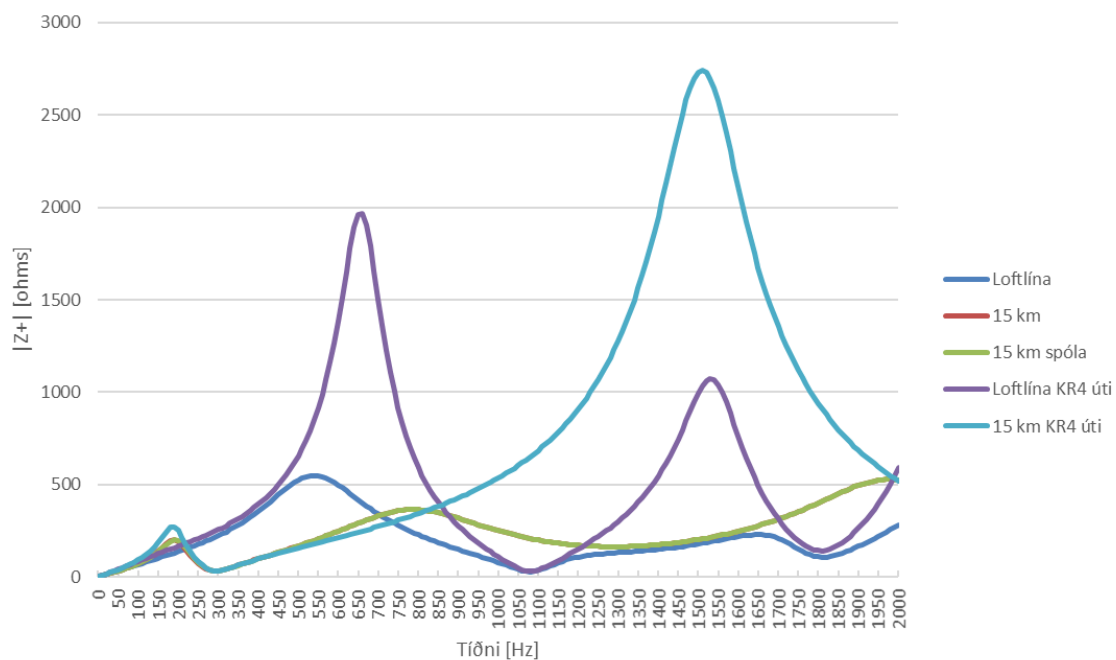
Samhliða meðsvæiflutíðnir magna upp strauma á sömu tíðni sem geta valdið mikilli bjögun í spennu. Viðnám spenna og strengja dempar þó meðsvæiflutíðnir kerfisins. Viðnám eykst einnig með aukinni tíðni vegna yfirborðsleitni straums. Í þessari athugun eru notuð líkön af raflínum (strengjum og loftlínum) sem eru tíðniháð sem taka tillit til áhrifa tíðni á viðnám þeirra.

3.4.2.1 Yfirtónagreining séð frá 220 kV teini í Kröflu

Tíðniróf séð frá 220 kV teini í Kröflu er reiknað miðað við óskert kerfi og einnig þegar 220 kV loftlína á milli þeistareykja og Kröflu (KR4) er ekki í rekstri.

Fyrsta samhliða meðsvæiflutíðnin þegar KR3 er byggð sem loftlína, er í kringum 550 Hz (11. yfirtónn) (Mynd 3-10) í óskertu kerfi og er útslag hennar u.þ.b. 600 Ω. Þegar KR4 er ekki í rekstri er samhliða meðsvæiflutíðnin í kringum 650 Hz (13. yfirtónn) og útslag hennar u.þ.b. 1950 Ω.

Þegar 15 km hluti KR3 hefur verið lagður í jörðu lendir fyrsta samhliða meðsvæiflutíðnin á mun lægri tíðni eða í kringum 130 Hz (tæplega 3. yfirtónn). Útslag fyrstu meðsvæiflutíðninnar er 157 Ω sem er lægra en þegar KR3 er byggð sem loftlína. Þegar KR4 er ekki í rekstri er meðsvæiflutíðnin svipuð en útslagið er hærra (200 Ω). Það bendir til þess að jarðstrengshlutinn KR3 hafi mikil áhrif á staðsetningu samhliða meðsvæiflutíðninnar. Lítil munur er á yfirtíðnirófi hvort sem strengurinn er með eða án útjöfnunarspóla.



Mynd 3-10 - Tíðniróf séð frá 220 kV teini Kröflu miðað við KR3 sem loftlínu og KR3 með 15 km streng í miðri loftlínu

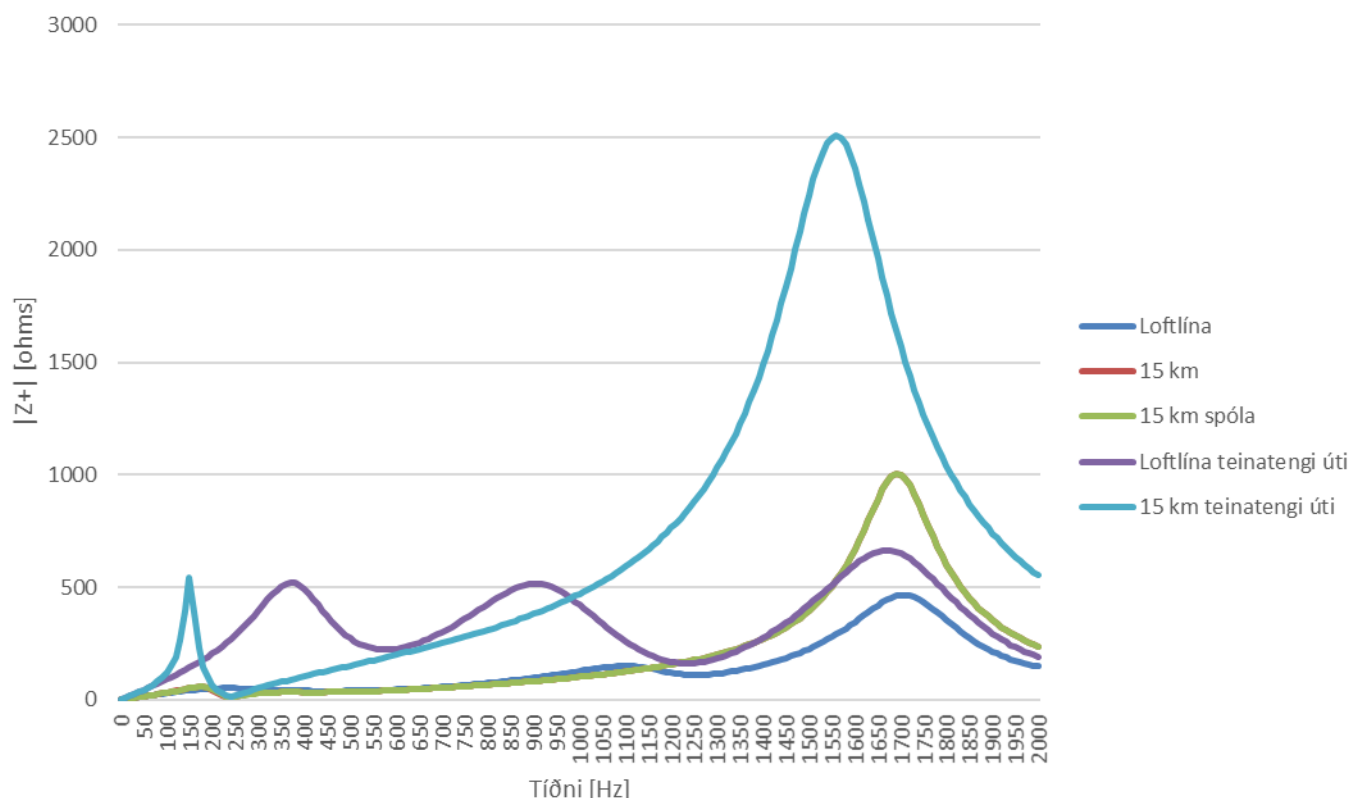
Í óskertu kerfi má sjá að önnur samhliða meðsvæiflutíðni KR3 þegar hluti hennar er lagður í jarðstreng er í kringum 840 Hz og útslag í kringum 280 Ω.

Viðnám meðsvæiflutíðna er í öllum tilfellum undir 1000 Ω fyrir tíðnir lægri en 150 Hz, þ.e. vel undir 1000 Ω viðmiðinu.

3.4.2.2 Yfirtónagreining séð frá teini í Fljótsdal

Tíðniróf séð frá teini í Fljótsdal er skoðað fyrir óskert kerfi og þegar teinatengi í Fljótsdal er opið. Við opið teinatengi er gert ráð fyrir að álver Alcoa og 5 vélar Fljótsdalsvirkjunar séu reknar sem eyja. Slíkt rekstartilvik er líklegt.

Fyrsta samhliða með sveiflutíðnin í óskertu kerfi miðað við að KR3 sé byggð sem loftlína er í kringum 1100 Hz með 150 Ω útslagi (Mynd 3-11). Önnur samhliða með sveiflutíðnin er öllu hærri eða í kringum 465 Ω nálægt 1680 Hz.



Mynd 3-11 - Tíðniróf séð frá Fljótsdal miðað við KR3 sem loftlínu og KR3 með 15 km streng í miðri loftlínu

Þegar 15 km hluti KR3 hefur verið lagður í jörðu er fyrsta samhliða með sveiflutíðnin í óskertu kerfi 120 Hz með 46 Ω útslagi. Önnur samhliða með sveiflutíðnin er í kringum 1800 Hz og hefur 900 Ω útslag.

Við opið teinatengi þegar KR3 er byggð sem loftlína er fyrsta með sveiflutíðnin í kringum 380 Hz og önnur með sveiflutíðnin í kringum 910 Hz. Bæði fyrsta og önnur með sveiflutíðnin hefur u.þ.b. 520 Ω útslag.

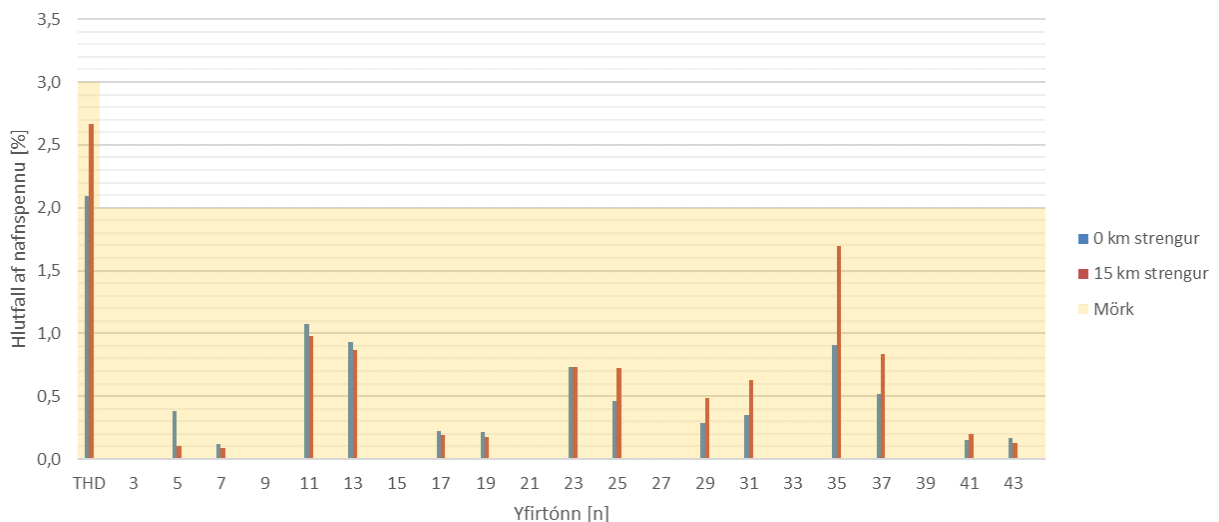
Þegar 15 km hluti KR3 hefur verið lagður í jörðu og teinatengi opið er fyrsta með sveiflutíðnin í kringum 150 Hz með u.þ.b. 510 Ω útslagi. Önnur samhliða með sveiflutíðnin hefur hátt útslag u.þ.b. 2500 Ω í kringum 1600 Hz. Þessi gildi eru öll vel innan marka.

3.4.2.3 Yfirtónar í Fljótsdal

Yfirtónagjafi fyrir yfirtóna (2. yfirtónn og hærri) dæmigerðs 200 MVA 12 púlsa álags var tengdur við tein í Fljótsdal til að líkja eftir mældri spennubjöggun í Fljótsdal. Yfirtónar í spennu voru mældir með og án jarðstrengs í KR3. "Total Harmonic Distortion" (THD) án jarðstrengs er um 2,1% en 2,7% þegar hluti KR3 er lagður í jörðu (Mynd 3-12).

Þegar einstakir yfirtónar í Fljótsdal, með og án jarðstrengs í KR3, sést að 2. – 14. yfirtónn er hærri án jarðstrengs en 25. yfirtónn og hærri hafa meira útslag þegar hluti KR3 er lagður í jörðu. Samhliða með sveiflutíðni nálægt 1800 Hz styrkist þegar hluti KR3 er lagður í jörðu sem hefur þau áhrif að yfirtónar á hærri tíðnum magnast.

Heildarbjöggun og bjöggun vegna einstakra yfirtóna eru þó innan marka í báðum tilfellum og hafa því ekki áhrif á mögulega lengd jarðstrengs.



Mynd 3-12 - Yfirtónar miðað við KR3 sem loftlína alla leið og miðað við 15 km strenghluta fyrir miðju

3.4.2.4 Niðurstaða yfirtónagreininga

Aukin strengvæðing hefur í för með sér að með sveiflutíðnir kerfisins færast á lægri tíðnir. Í mörgum tilfellum dregur þó úr útslagi með sveiflutíðna þegar hluti loftlínu er lagður í jörðu. Nauðsynlegt er að athuga skert rekstrartilfelli þar sem útslag með sveiflutíðna er oft hærra við slíkar aðstæður.

Illa dempaðar með sveiflutíðnir á lægri tíðnum geta aukið á svipular spennusveiflur í kerfinu þegar einingar eru spennusettar og greina þarf hvort slíka hættu sé fyrir hendi þar sem hún ógnar rekstraröryggi kerfisins.

Heildarspennubjöggun (THD) eykst ef strengur hefur þau áhrif að með sveiflutíðnir teins færast á þær tíðnir sem yfirtónar eru til staðar. Í þessari athugun er bjöggun innan marka reglugerðar og hefur því ekki áhrif á mögulega lengd strengs.

3.4.3 Spennusetning KR3

Þegar raflína (jarðstrengur eða loftlína) er spennusettt er rofa öðrum megin lokað fyrst. Við spennusetningu má líta á raflínuna sem óhlaðna rýmd og spólu. Við spennusetningu

hleðst rýmdin í gegnum spóluna sem leiðir til svipulla yfirspenna. Skömmu eftir spennusetningu er rýmdin full hlaðin og spenna hennar jöfn rekstrarspennu kerfisins. Á því augnabliki er straumur í spólu í hámarki. Vegna orku sem er geymd í spólunni heldur spenna rýmdar áfram að aukast þangað til hún nær hámarki sínu.

Þegar spennan hefur náð hámarki dempast hún þangað til hún verður jöfn spennu kerfisins. Tíðni svipulla yfirspenna ræðst að mestu af bylgjuviðnámi raflínunnar sem er spennusettt.

Strengir hafa mun meiri rýmd en loftlínur og því má gera ráð fyrir því að tíðni svipulla yfirspenna og útslag þeirra breytist við innsetningu. Tímasetning innsetningar raflínu hefur líka áhrif á útslag svipulla yfirspenna og því er nauðsynlegt að skoða svipullar yfirspennur fyrir mörg mismunandi innsetningarhorn.

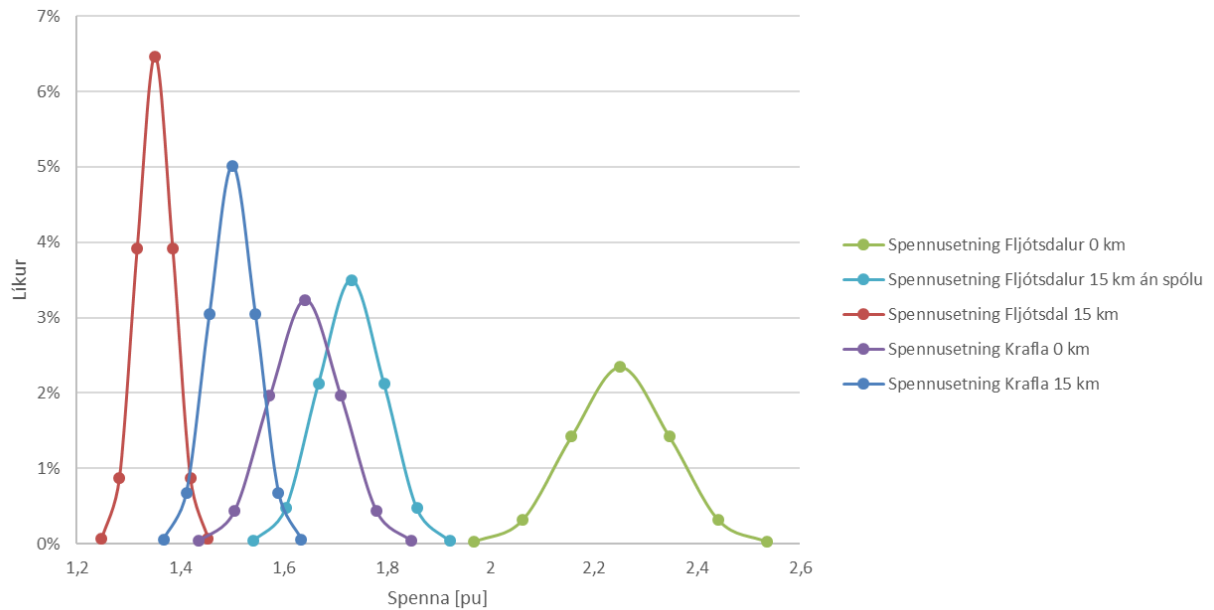
Skoðuð eru tvö tilvik fyrir Kröflulínu 3:

- KR3 byggð sem loftlína alla leið
- 15 km hluti KR3 lagður í jörðu fyrir miðju hennar en loftlína restina af leiðinni

Miðað við 15 km jarðstreng var þörf á að setja spólur á strengendana, 48 Mvar spólu nær Fljótsdal og 10 Mvar spólu nær Kröflu.

Mynd 3-13 sýnir líkindadreifingu yfirspenna á opnum enda við spennusetningu. Skoðuð er spennusetning KR3 frá Kröflu og Fljótsdal. Lægri yfirspennur myndast við opinn enda þegar hluti KR3 er lagður í jörð. Yfirspennur sem myndast við spennusetningu KR3 byggð sem loftlína alla leið eru hærri og hafa meiri dreifingu en yfirspennur sem myndast þegar hluti hennar hefur verið lagður í jörðu.

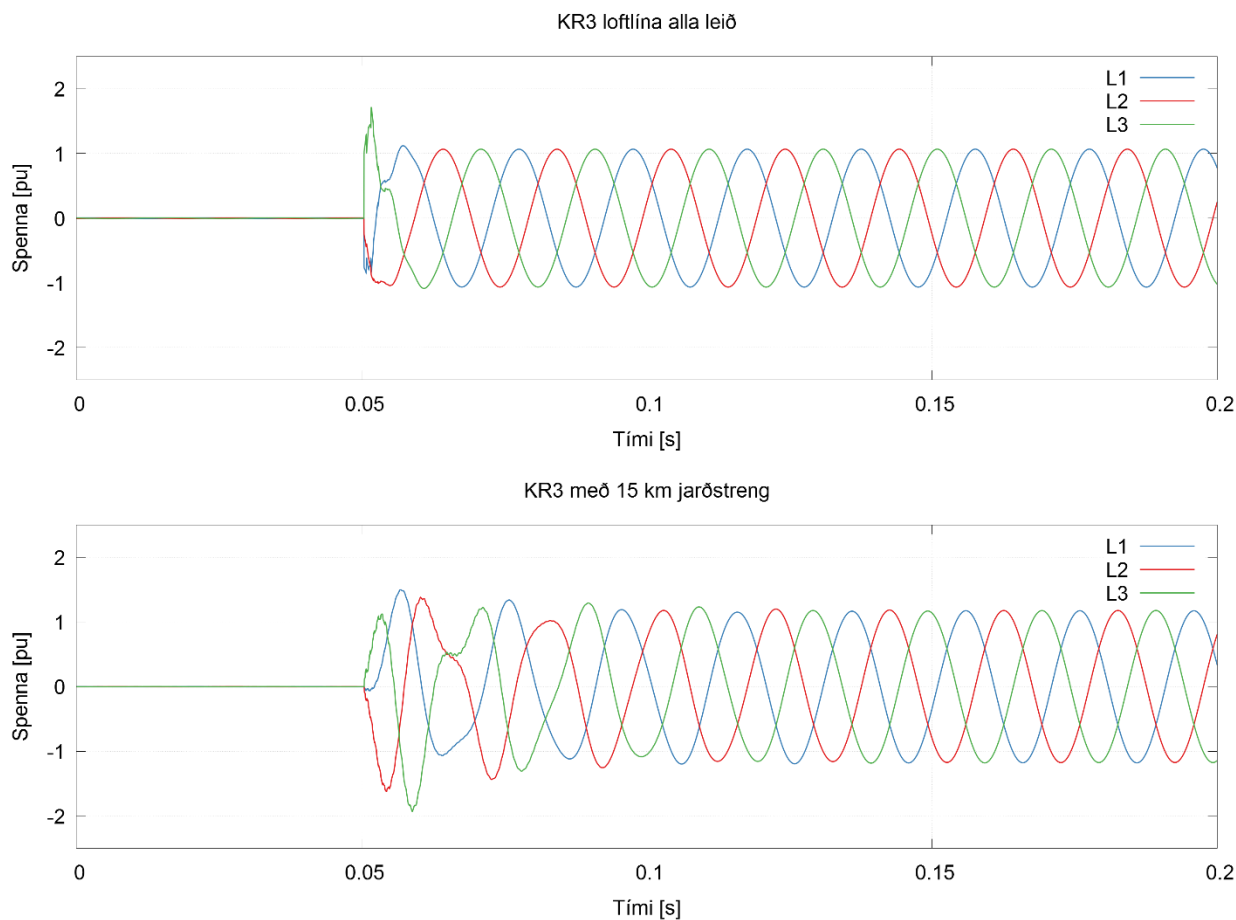
Útslag yfirspenna sem myndast við spennusetningu frá Fljótsdal er hærra en við spennusetningu frá Kröflu. Skammhlaupsafl í Fljótsdal er mun hærra en í Kröflu. Af því má draga þá ályktun að við spennusetningu frá stífum punkti þá verði yfirspennurnar hærri en við spennusetningu frá veikum punkti. Þegar spólur voru fjarlægðar af strengendum KR3 og hún spennusettt þá voru yfirspennurnar hærri en í því tilfalli þegar spólur voru á strengendunum. Ljóst er að spólur hafa dempanði áhrif á útslag svipulla yfirspenna við spennusetningu.



Mynd 3-13 - Líkindadreifing yfirspenna á opnum enda við spennusetningu

3.4.3.1 Spennusetning KR3 frá Kröflu

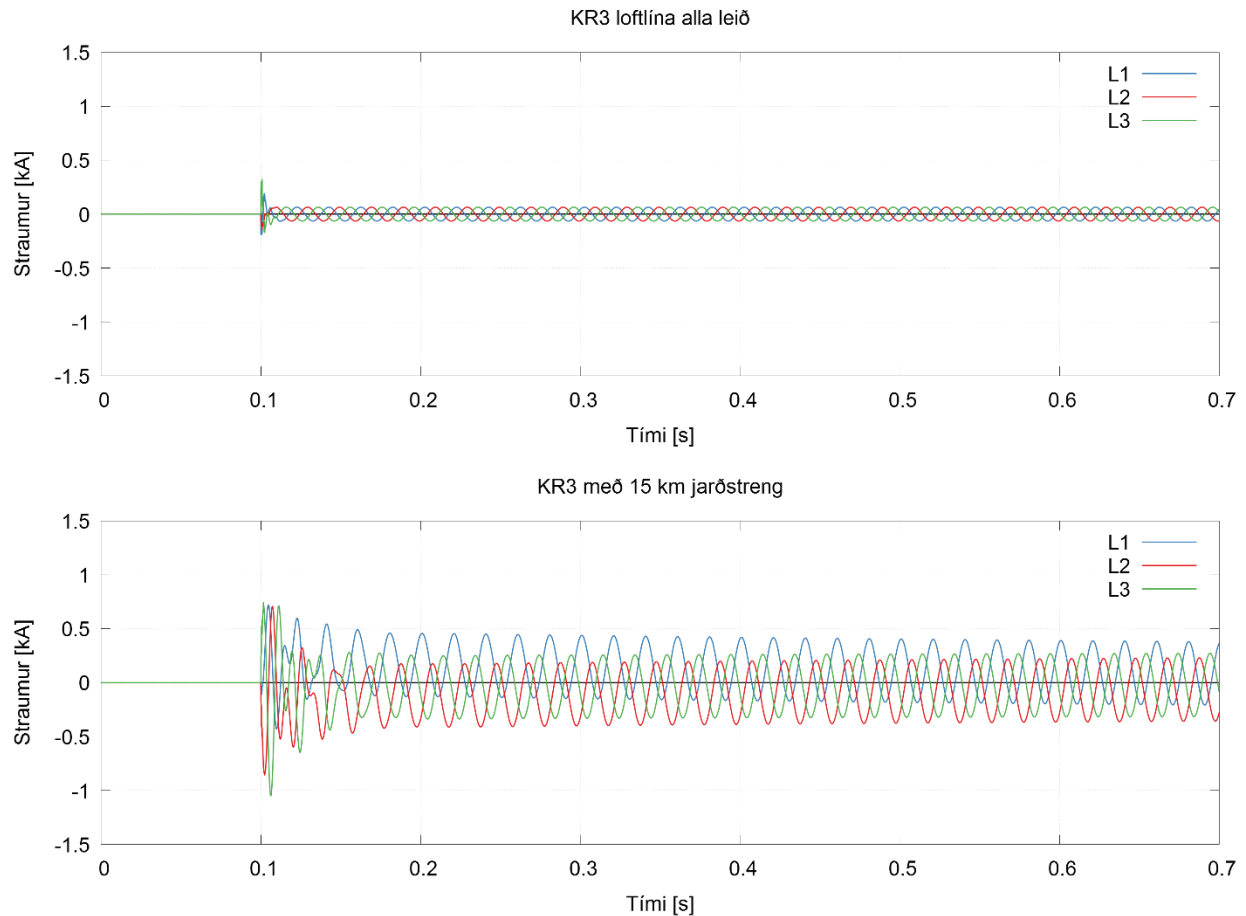
Til að finna hæstu yfirspennu við spennusetningu og dreifingu yfirspenna voru keyrðar margar hermanir með mismunandi innsetningarhorni. Á Mynd 3-14 má sjá innsetningu KR3 frá Kröflu sem loftlínu og þegar hluti hennar er lagður í jörðu miðað við það innsetningarhorn sem gaf hæsta yfirspennu. Lægri yfirspenna myndast við opinn enda þegar KR3 er lögð sem loftlína alla leið (1,85 pu) en þegar hluti hennar lagður í jörðu (1,95 pu). Við spennusetningu KR3 sem loftlínu alla leið eru yfirspennur vel dempaðar, á u.þ.b. 5 ms. Þegar hluti KR3 er lagður sem jarðstrengur eru yfirspennur minna dempaðar og eru ekki orðnar full dempaðar fyrr en eftir u.þ.b. 60 ms. Rofyfirspenna er þó undir viðmiðunarmörkum, 2,5 pu, í báðum tilfellum.



Mynd 3-14 - Spennur við spennusetning KR3 frá Kröflu

Á Mynd 3-15 má sjá innsetningarstrauma fyrir KR3 sem loftlínu og þegar hluti hennar lagða í jörðu. Útslag innsetningarstraums loftlínunnar er u.þ.b 300 A sem er mun minna en útslag innsetningarstraums þegar hluti hennar lagður í 15 km jarðstreng (0,75 kA). Innsetningarstraumur loftlínu dempast mjög hratt. Innsetningarstraumur við spennusetningu KR3 þegar hluti hennar er lagður í jörðu tekur lengri tíma að ná jafnvægi (lengra en 600 ms). Jafnframt má sjá hliðrun riðstraumspáttar innsetningarstraums vegna jafnstraumspáttar. Hliðrun jafnstraumspáttar er þó ekki svo mikil að það valdi „zero-miss“. Vegna dempunar í loftlínuhlutanum er mögulegt að auka útjöfnun áður en „zero-miss“ verður vandamál við spennusetningu frá KR3.

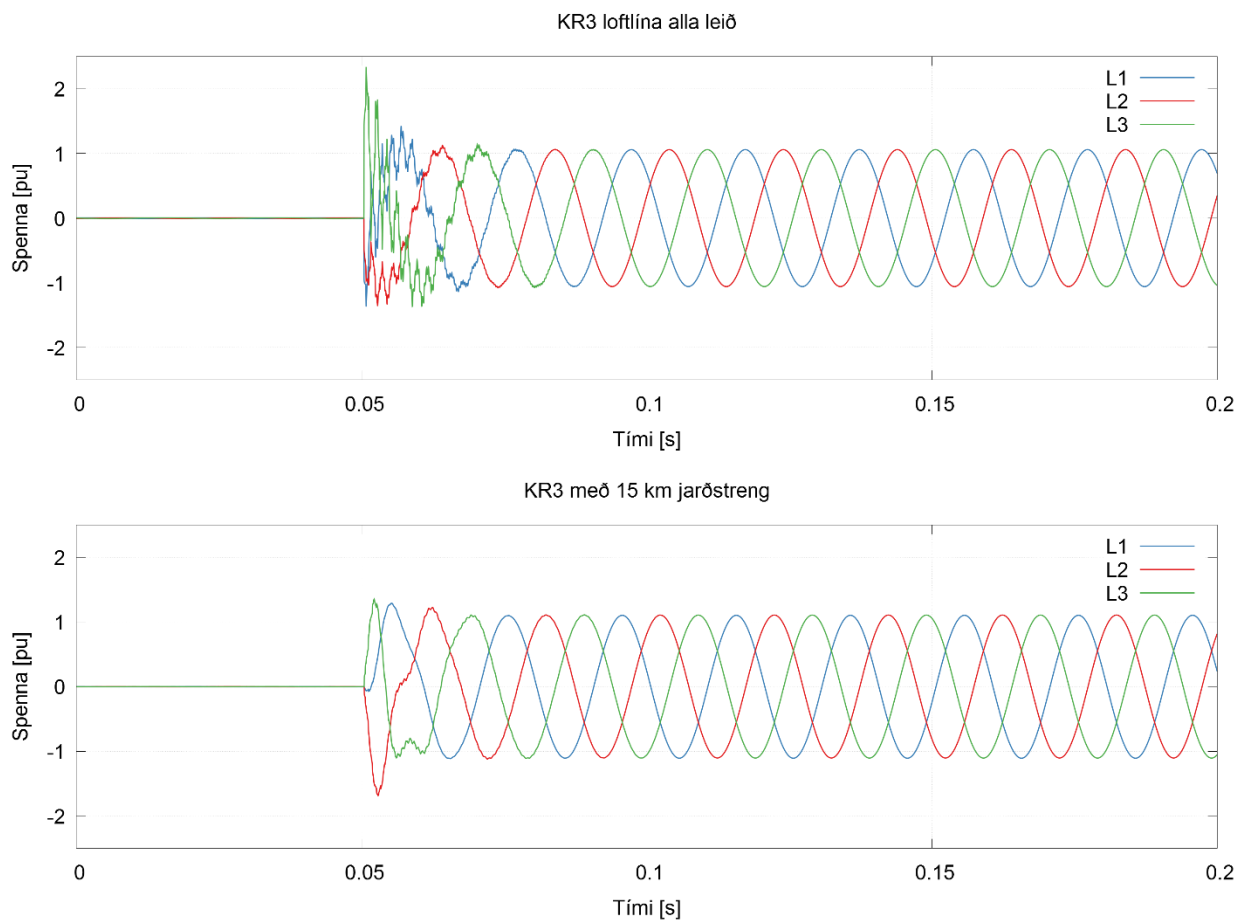
Hleðslustraumur KR3 þegar hluti hennar er lagður í jörðu er mun hærri en þegar hún er byggð alfarið sem loftlína.



Mynd 3-15 - Straumar við spennusetning KR3 frá Kröflu

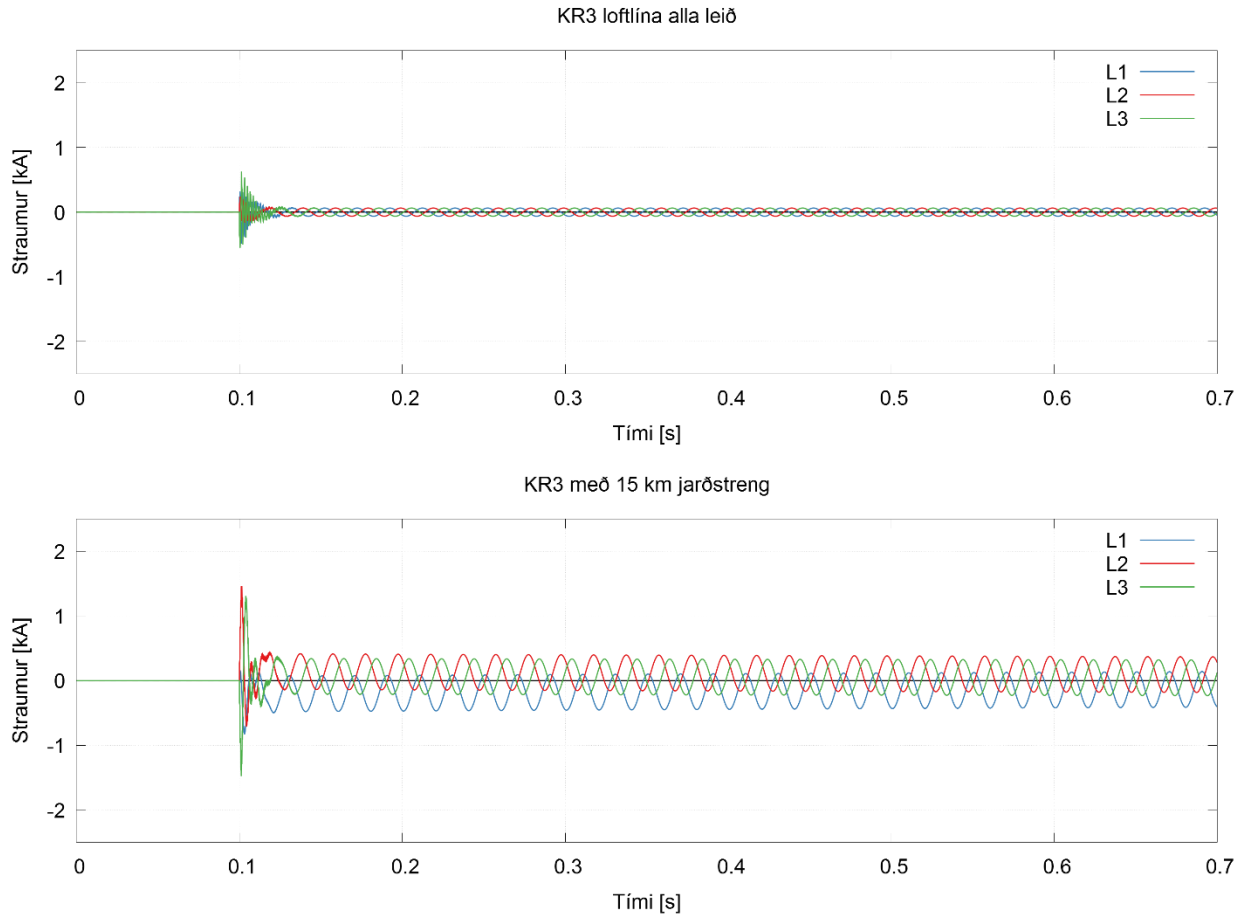
3.4.3.2 Spennusetning KR3 frá Fljótsdal

KR3 er spennusettt frá Fljótsdal og spenna í opnum enda við Kröflu er mæld. Bornar eru saman niðurstöður við spennusetningu KR3 sem loftlínu og þegar 15 km hluta hennar hefur verið lagður í jörðu. Útslag við spennusetningu KR3 þegar hún er byggð sem loftlína alla leið er u.þ.b. 2,35 pu (Mynd 3-16). Þegar 15 km hluti loftlínunnar hefur verið lagður í jörðu er hæsta yfirspenna við spennusetningu u.þ.b. 1,6 pu. Við spennusetningu KR3 sem loftlínu alla leið dempast spennusveiflur út á u.þ.b. 10 ms en þegar hluti hennar hefur verið lagður í jörðu tekur það u.þ.b. 30 ms. Rofyfirspegnur eru undir 2,5 pu í báðum tilfellum og takmarka því ekki lengd loftlínu eða strengs.



Mynd 3-16 - Spennur við spennusetningu KR3 frá Fljótsdal

Mesta útslag innsetningarstraums KR3 byggð sem loftlína alla leið er í kringum 700 A á meðan mesta útslag innsetningarstraums er 1,3 kA þegar hluti hennar hefur verið lagður í jörðu (Mynd 3-17). Jafnframt má sjá að jafnstraums þáttur innsetningarstraumsins er illa dempaður. Í samanburði við spennusetningu frá Kröflu er meiri hliðrun í riðstraumi vegna jafnstraumspáttar þar sem skammhlaupsafl í Fljótsdal er hærra. Mögulegt er að auka launafslútföfnun örlítið áður en straumur fer ekki lengur í gegnum núll.



Mynd 3-17 - Straumar við spennusetning KR3 frá Fljótsdal

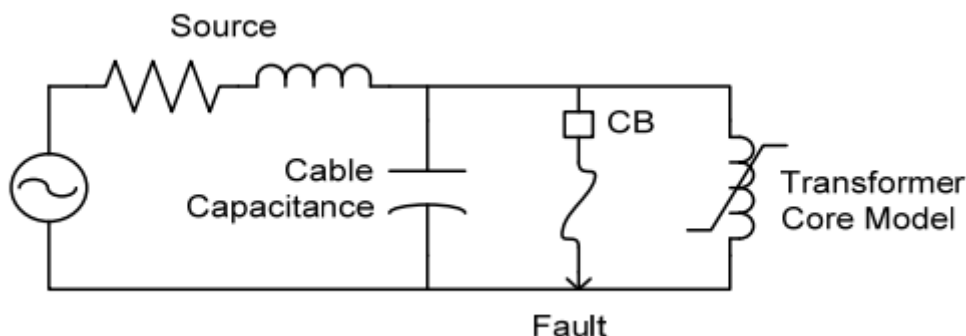
3.4.3.3 Niðurstöður yfirspennugreiningar við spennusetningu

Spennusetning KR3 þegar 15 km eru lagðir í jörðu veldur lægri yfirspennum við opinn enda þegar hún er spennusettt frá Fljótsdal en þegar hún er byggð sem loftlína alla leið. Hinsvegar við spennusetningu frá Kröflu, sem er veikari punktur, þá er yfirspenna hærrí. Jafnframt hefur spennusetning frá stífum punkti í för með sér að útslag yfirspenna er hærra en ef spennusettt er frá veikum punkti.

Þegar hluti loftlínu er lagður í jörðu og úttjöfnunarspólur eru á hvorum enda strengs getur myndast jafnstraumspáttur í innsetningarstraum sem hliðrar riðstraumspætti. Mögulegt er að auka úttjöfnun til að leggja örlítið lengri streng (að hámarki 2 – 3 km í viðbót), en spennusetning frá Fljótsdal er takmarkandi.

3.4.4 Tímabundnar yfirspennur (e. Temporary Overvoltage)

Tímabundnar yfirspennur geta myndast við truflanir. Við truflun nálægt spennum halda þeir segulmögnun sinni (Mynd 3-18). Þegar truflunin er yfirstaðin þegar spenna nær aftur málgildi sínum getur spennirinn farið í mettun. Við það geta skapast tímabundnar yfirspennur í kerfinu. Ef strengir eru nálægt slíkum spennum getur það leitt til þess að slíkar yfirspennur standa yfir í þó nokkurn tíma sem setur álag á einangrun og yfirspennuvara kerfisins og getur leitt að einingar kerfisins bili. Tímabundnar yfirspennur geta orðið af völdum spennusetningar eininga en hér verða einungis skoðaðar tímabundnar yfirspennur vegna truflunar.



Mynd 3-18 - Einfaldað rásarlíkan fyrir truflun nálægt spennu tengdum með jarðstreng [1]

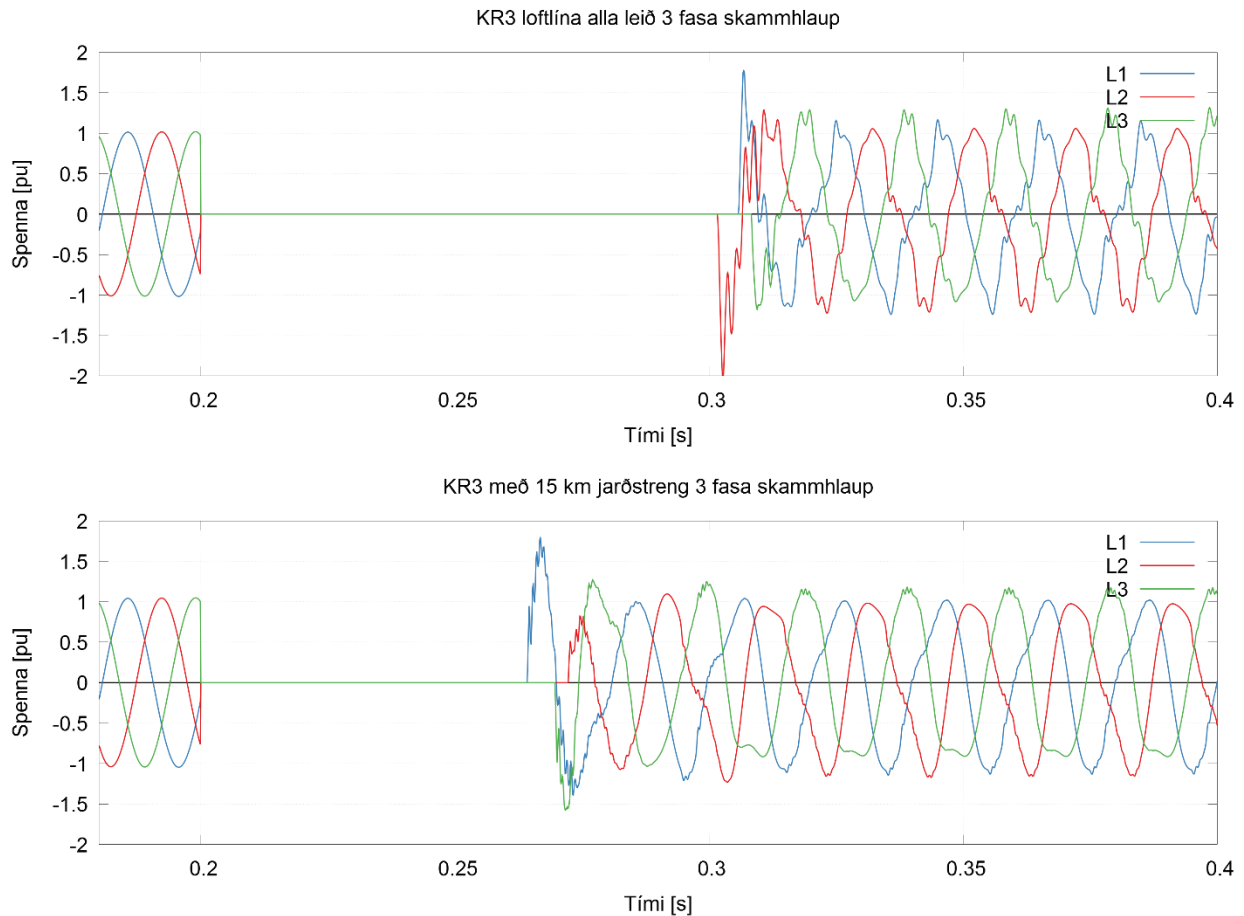
Þegar tímabundnar yfirspennur eru skoðaðar áður en verkhönnun fer fram er nauðsynlegt að kortleggja öll möguleg rekstrartilfelli og greina. Þar sem þessi skýrsla er á forathugunarstigi eru einungis skoðuð tvö líkleg rekstrartilfelli. Það fyrsta er þegar truflun verður á línu milli Kröflu og Þeistareykja og það seinna þegar truflun verður nálægt Fljótsdal og teinatengi í Fljótsdal leysir út. Mögulegt er að önnur rekstrartilfelli hafi áhrif á mögulega strenglengd.

3.4.4.1 Truflun nálægt Kröflu

Til að skoða tímabundnar yfirspennur nálægt Kröflu var settur inn 100 MVA spennir með stöðluðum parametrum á milli spennustiga (220 kV og 132 kV). Líkan spennis inniheldur segulheldnilykkju hans og því tekur líkan hans tillit til mettunar segulkjarna. Líkan sem tekur tillit til mettun járnkjarna spennis er forsenda þess að hægt sé að herma slíkar yfirspennur.

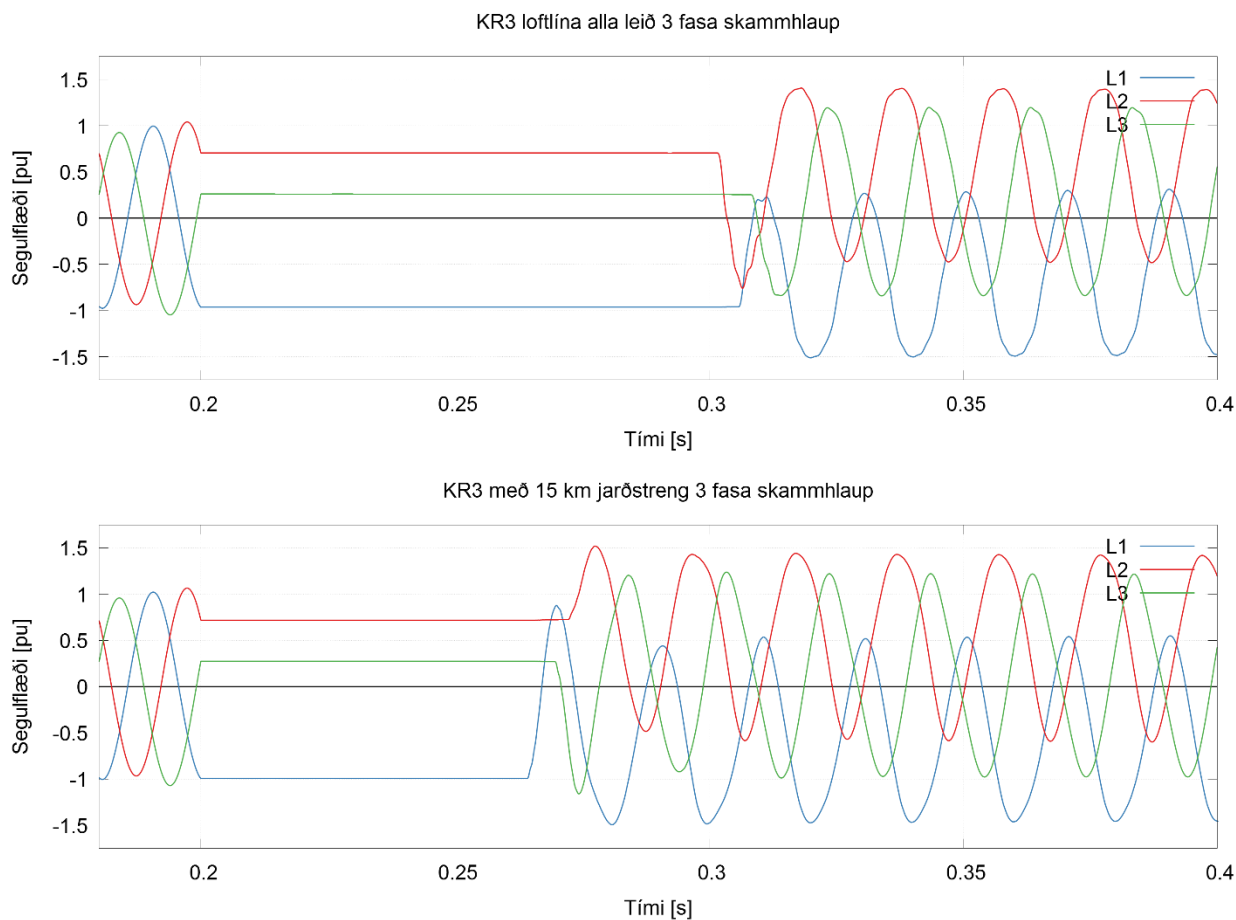
Þriggja fasa truflun er sett á 220 kV línuna milli Kröflu og Þeistareykja og línan rofin frá eftir truflun. Spenna á 220 kV teini í Kröflu er mæld (Mynd 3-19) fyrir Kröflulínu 3 alfarið í lofti og einnig þegar hluti hennar er settur í jörðu.

Þegar KR3 er alfarið í lofti verður yfirspennan í kringum 2 pu en dempast hratt. Þegar KR3 er að hluta í jörðu verða yfirspennurnar örlítið lægri, í kringum 1,7 pu, en dempast hægar. Yfirspennuvarar byrja að hlaða við yfirspennu sem er nálægt hæstu rekstrarspennu. Við tímabundnar yfirspennur geta þeir dregið til sín meiri orku en þeir þola og sprungið. Minni líkur eru á að slíkt hendi í kerfi sem einkennist af loftlínunum þar sem yfirspennurnar dempast hraðar og eru ekki á jafn lágri tíðni. Áhrif á yfirspennuvara eru sýnd í kafla 3.4.4.2. Truflun nálægt Kröflu veldur ekki tímabundinni yfirspennu sem fer yfir viðmiðunarmörkin sem eru 1,6 pu.



Mynd 3-19 - Tímabundnar yfirspekkur á 220 kV teini Kröflu við truflun á 220 kV loftlínu frá Kröflu að beistareykjum

Mynd 3-20 sýnir segulflæði (e. flux) í spenninum við truflun nálægt Kröflu. Við truflun þá heldur spennirinn segulflæði sínu stöðugu þar sem spennan fellur í núll og þegar truflun hefur verið rofin frá kerfinu fær hann spennu aftur og fer þá í metnun. Þegar hluti KR3 er lagður í jörðu fer 220/132 kV spennir í Kröflu meira í metnun en þegar KR3 er alfarið byggð sem loftlína.



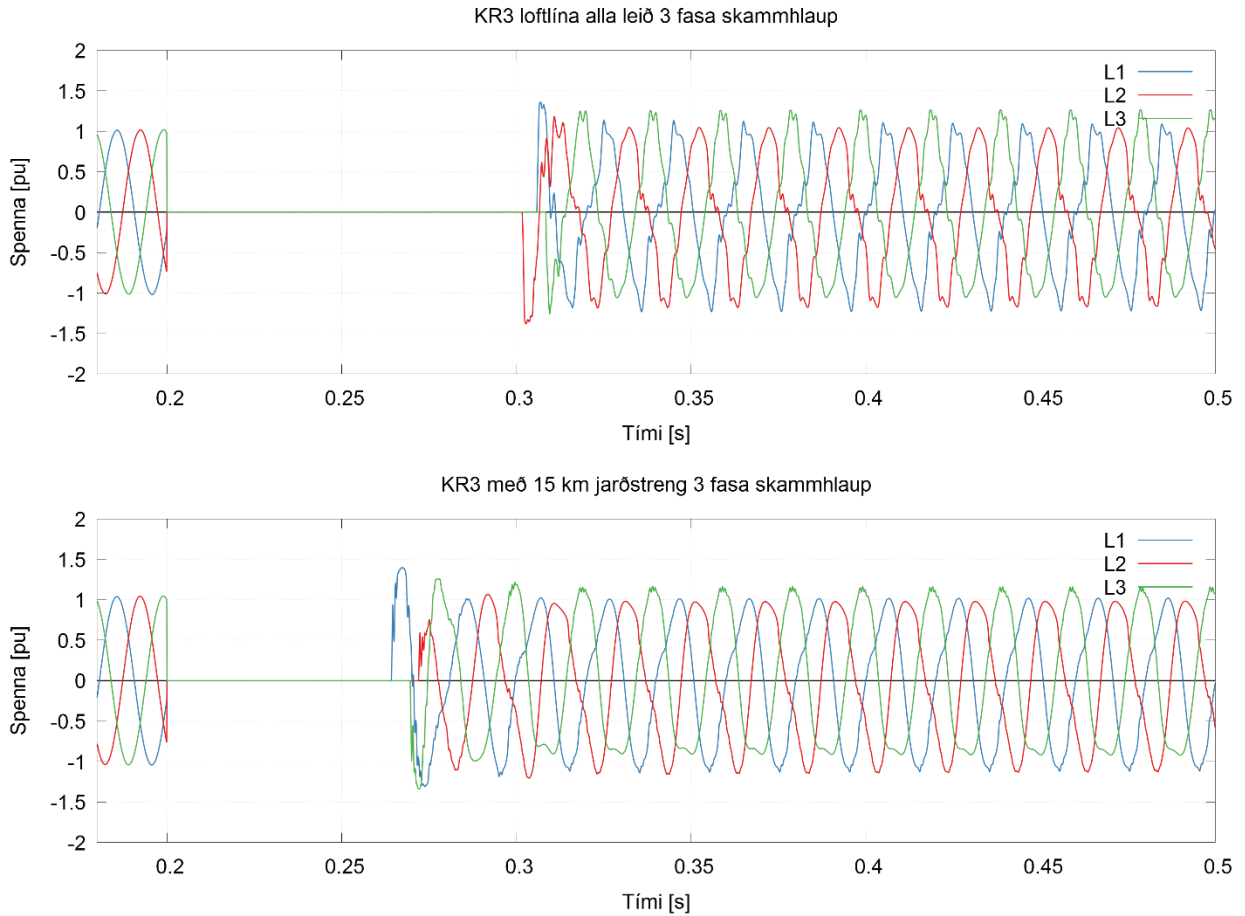
Mynd 3-20 - Segulflæði í spennu milli 220 kV og 132 kV tein í Kröflu við truflun á 220 kV loftlínu frá Kröflu að þeistareykjum

3.4.4.2 Truflun nálægt Kröflu með yfirspennuvara

Í tengivirkjum eru settir upp yfirspennuvarar til að verja viðkvæman búnað vegna eldinga og hárrar yfirspennu. Við tímabundnar yfirspennur geta eldingarvarar byrjað að leiða straum sem leiðir til þess að þeir hitna og geta eyðilagst ef yfirspennan stendur í langan tíma og valdið útleysingum.

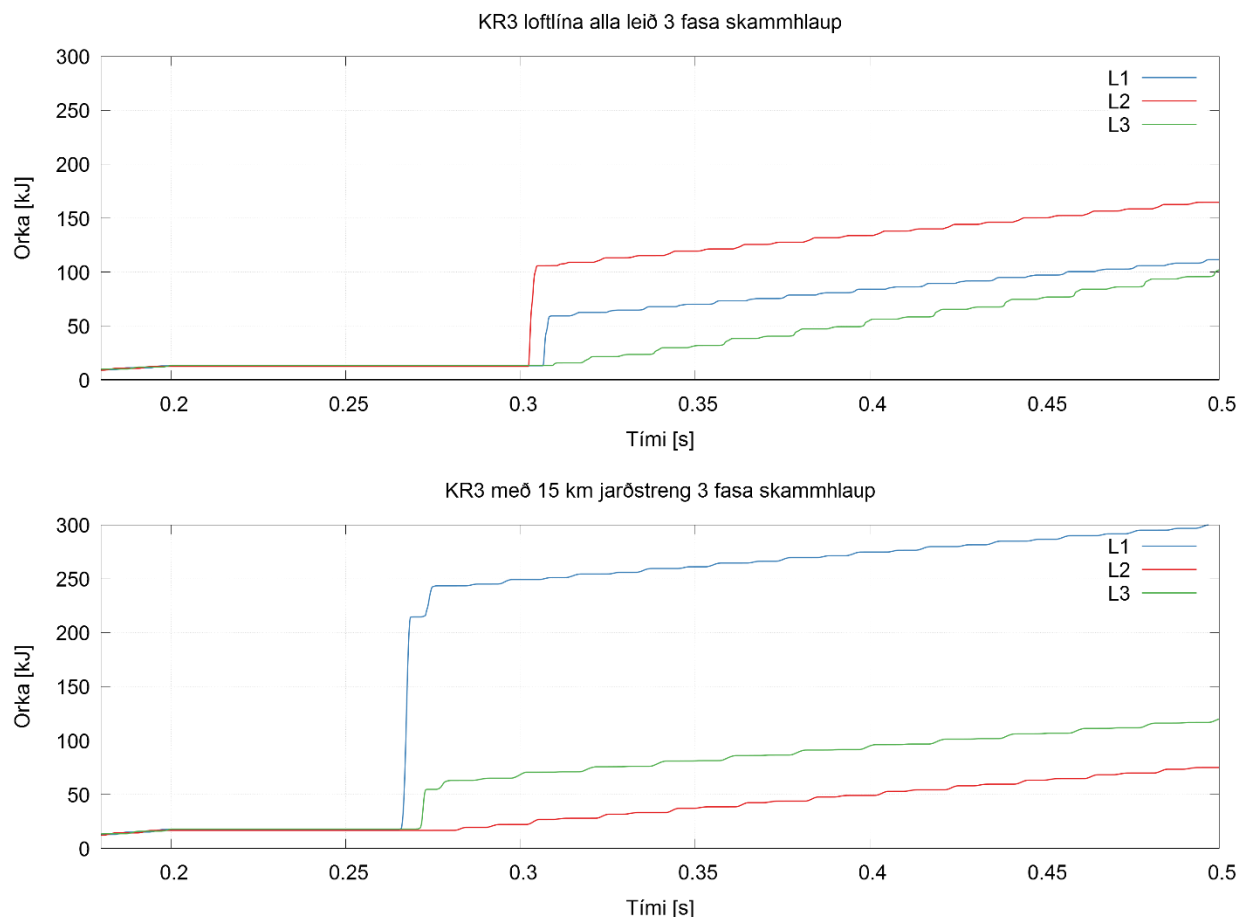
Í líkaninu er eldingarvari settur á 220 kV tein í Kröflu til að sýna mun á áhrifum tímabundinna yfirspenna við truflun þegar KR3 er byggð sem loftlína alla leið og þegar hluti hennar er lagður í jörðu. Notast var við staðlaðan yfirspennuvara í PSCAD með þeirri breytingu að leiðni hans við 1,1 pu spennu var breytt í 0,1 A.

Yfirspennur með eldingarvara (Mynd 3-21) eru lægri en án hans (Mynd 3-19) þar sem hann byrjar að leiða straum þegar spenna á teininum hækkar.



Mynd 3-21 - Tímabundnar yfirspennur á 220 kV teini í Kröflu við truflun á 220 kV loftlínu frá Kröflu að þeistareykjum. Eldingarvari settur á 220 kV tein í Kröflu

Þar sem tímabundnu yfirspennurnar vara lengur þegar hluti KR3 er lagður í jörðu dregur yfirspennuvarinn meiri orku en þegar KR3 er lögð alfarið sem loftlína (Mynd 3-22). Við það aukast líkurnar á því að hann valdi annarri truflun þegar hann bilar ef orkan sem hann leiðir fer yfir málgildi sín. Í þessu tilfalli leiðir hann 150% meiri orku við truflun.

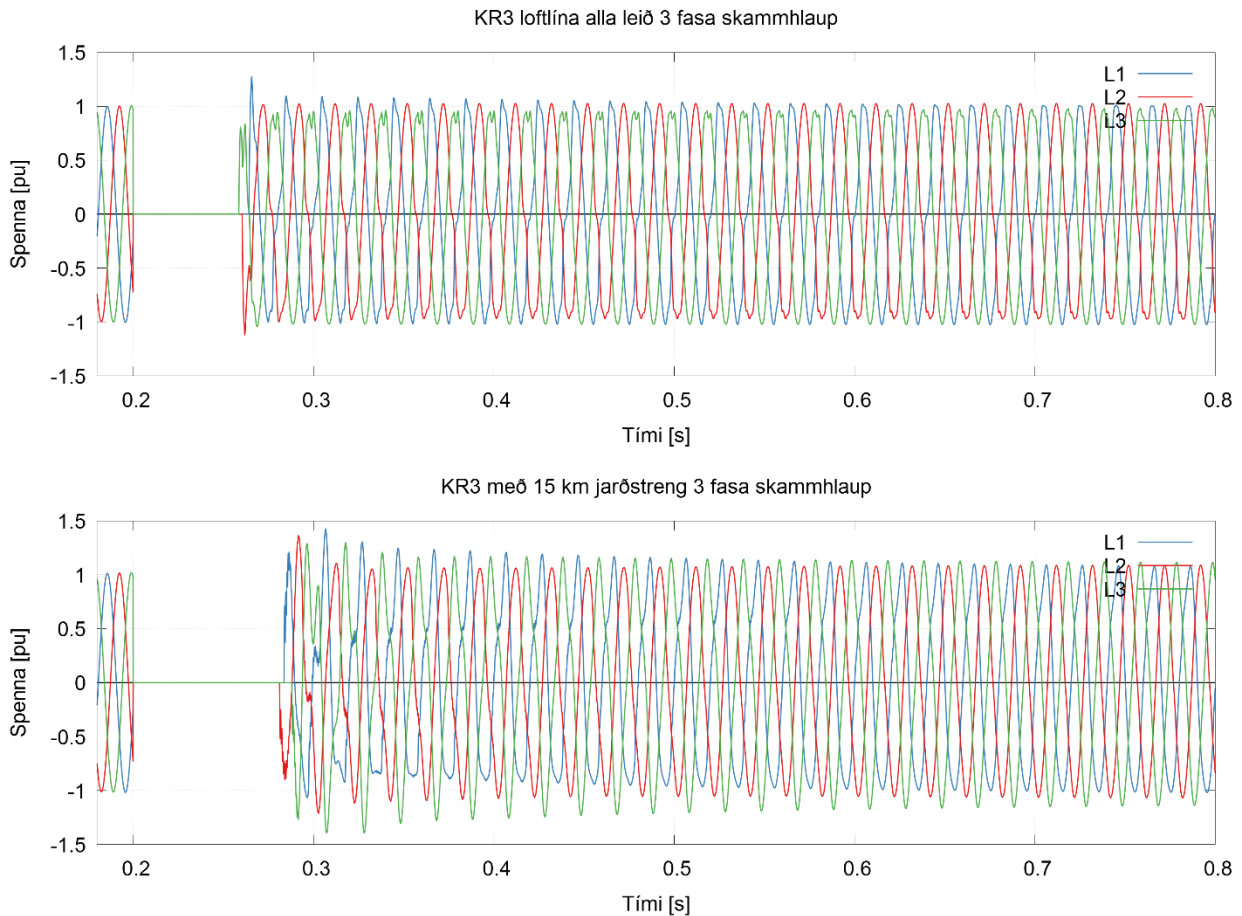


Mynd 3-22 - Orka sem yfirspennuvari á 220 kV teini í Kröflu dregur til sín við truflun á 220 kV loftlínu frá Kröflu að þeistareykjum.

3.4.4.3 Truflun nálægt Fljótsdal og rof á teinatengi í Fljótsdal

Líklegt rekstrartilfalli er þegar teinatengi í Fljótsdal er rofið og 5 vélar Fljótsdalsvirkjunar ásamt álveri Alcoa er rekið í eyju. Hermd var truflun nálægt Fljótsdal og í kjölfarið teinatengi við Fljótsdalsvirkjun rofið.

Þegar KR3 er lögð sem loftlína alla leið myndast engar tímabundnar yfirspennur (Mynd 3-23). Útslag spennu er u.þ.b. 1,3 pu. Þegar hluti hennar er lagður í jörðu myndast tímabundin yfirspenna (Fasi L3) sem er u.þ.b. 1,45 pu (Mynd 3-23) sem er tiltölulega illa dempuð. Útslag spennu í báðum tilfellum er þó undir viðmiðunarmörkum fyrir tímabundnar yfirspennur m.v. forsendur og takmarka því ekki strenglengd.



Mynd 3-23 - Tímabundnar yfirspennur á teini í Fljótsdal við truflun nálægt Fljótsdal og rof á teinatengi í Fljótsdal

3.4.4.4 Niðurstöður vegna greiningar á tímabundnum yfirspennum vegna truflunar

Þegar hluti KR3 er lagður í jörðu aukast vandamál tengd tímabundnum yfirspennum bæði í Kröflu og Fljótsdal. Þessar yfirspennur geta valdið því að búnaður eins og yfirspennuvarar eyðileggist sem leiðir til frekari útleysinga. Ef leggja á 15 km hluta KR3 í jörðu þyrfti að athuga vel eiginleika yfirspennuvara að þeir þoli að eyða þeirri orku sem myndast við yfirspennurnar. Önnur lausn væri að hækka nafnspennu yfirspennuvarans en það myndi leiða til þess að hærri yfirspennur gætu orðið í kerfinu en slíkt væri einungis hægt að gera með því að tryggja að hærri yfirspennur myndu ekki valda skemmdum hjá notendum eða á búnaði. Tímabundin yfirspenna er þó undir viðmiðunarmörkum skv. forsendum fyrir þau tilfelli sem voru skoðuð og takmarka því ekki strenglengdina.

3.4.5 Niðurstöður svipulla athugana fyrir KR3

Yfirtónagreining sýndi að heildarbjögun jókst um u.þ.b. 0,5% þegar hluti loftlínu er lagður í jörðu. Bjögun vegna yfirtóna er þó innan viðmiðunarmarka og takmarkar því ekki strenglengd. Tíðniróf sýndi jafnframt að viðnám var undir 1000 Ω fyrir samhliða meðsvæiflutíðnir undir þriðja yfirtón.

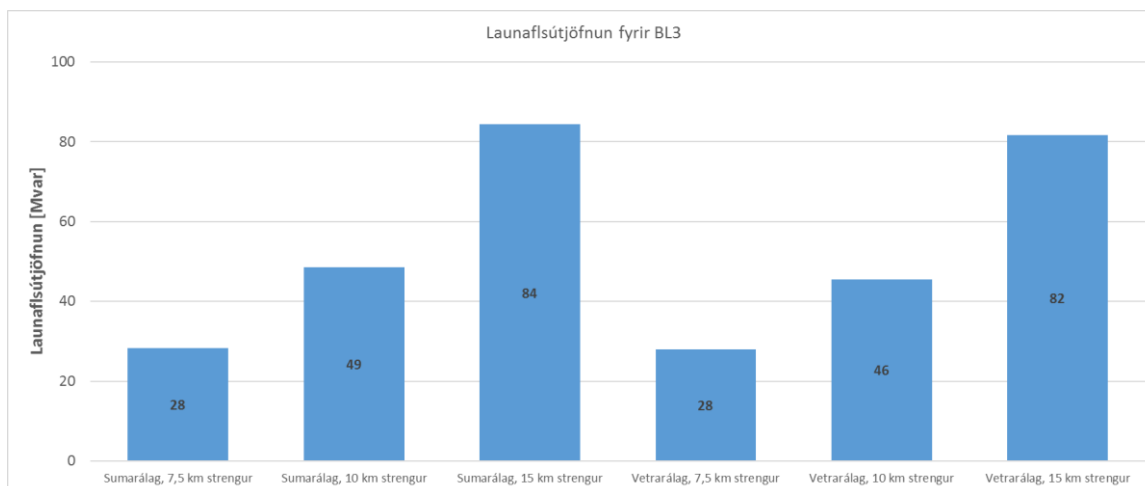
Yfirspenna vegna spennusetningar er hærri í tilfalli þegar lína er lögð sem loftlína alla leið. Fyrir KR3 fer yfirspenna við spennusetningu þó ekki yfir viðmiðunarmörk og ekki er þörf á sérstökum aðgerðum vegna þessa.

Við truflanir í kerfinu myndast tímabundnar yfirspennur í strengkerfinu. Þær eru þó undir viðmiðunarmörkum og takmarka ekki strenglengd.

Við spennusetningu með 50% útjöfnun má sjá að straumur fer í gegnum núllpunkt og „zero-miss“ á sér ekki stað. Mögulegt er að lengja streng örlítið (um 2 – 3 km að hámarki) áður en núllgegnumgangur verður takmarkaður (zero miss).

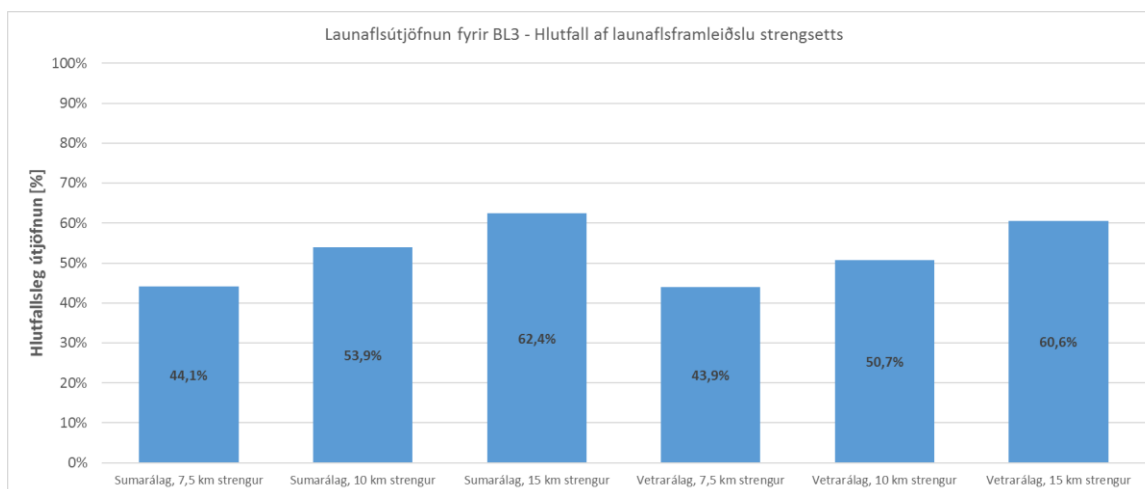
4.1 Launafslúttjöfnun – Afhlæðigreining - PSS®E

Þrjár lengdir jarðstrengja voru hermdar fyrir Blöndulínu 3; 7,5 km, 10 km og 15 km, ásamt tveimur álagstilfellum, sumarálág og vetrarálág. Mynd 4-2 sýnir úttjöfnunarþörf [Mvar] fyrir Blöndulínu 3 þegar línuhlutinn næst Rangárvöllum er lagður í jörðu:



Mynd 4-2 - Samanburður á nauðsynlegri launafslúttjöfnun, sumar og vetur, 7,5, 10 og 15 km strengur

Mynd 4-3 sýnir hlutfallslega úttjöfnun fyrir tilfellin á Mynd 4-2:



Mynd 4-3 - Hlutfallsleg úttjöfnunarþörf fyrir BL3

Niðurstöður sýna að hlutfallsleg úttjöfnunarþörf er yfir 50% fyrir bæði 10 km og 15 km jarðstrengi sem hluti af Blöndulínu 3. Hlutfallsleg úttjöfnunarþörf fyrir 7,5 km langan jarðstreng er nokkuð undir 50%. Fyrir 7,5 km langa jarðstrengi er heildar úttjöfnunarþörfin tæp 44%, 50-55% fyrir 10 km langa jarðstrengi og um 55-60% fyrir 15 km langa jarðstrengi. Niðurstöðurnar sýna jafnfram að úttjöfnunarþörfin er að mestu óháð þeim álagstilfellum sem voru skoðuð, þ.e. flæði um línuna.

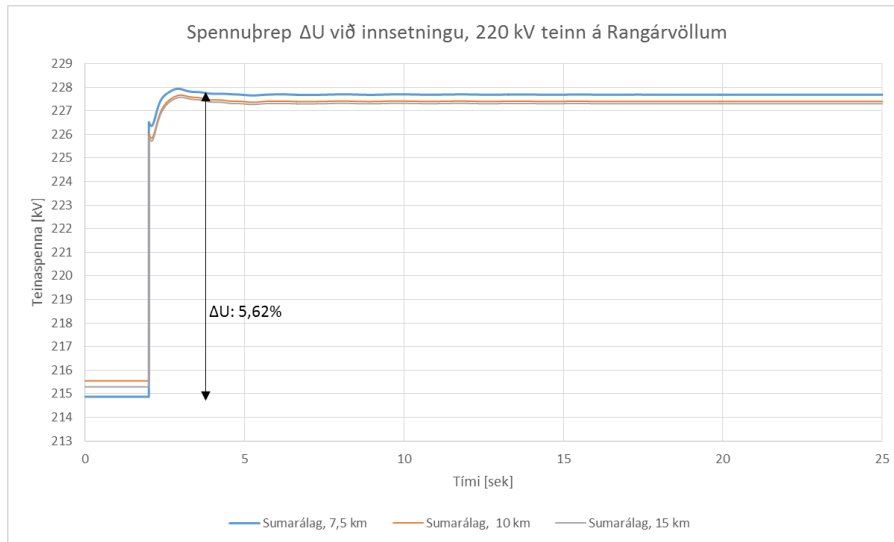
4.2 Stöðugleiki og spennuþrep – Greining á kvikri hegðun - PSS®E

Gerðir eru útreikningar á kvikri svörun við spennusetningu frá Blöndu. Kerfinu er stillt upp með sumarálagi þar sem einhverjar vinnslueiningar eru úti og álag frekar lítið

annars vegar og dæmigerðu vetrarkerfi hins vegar þar sem álag er hátt og allar vinnslueiningar inni.

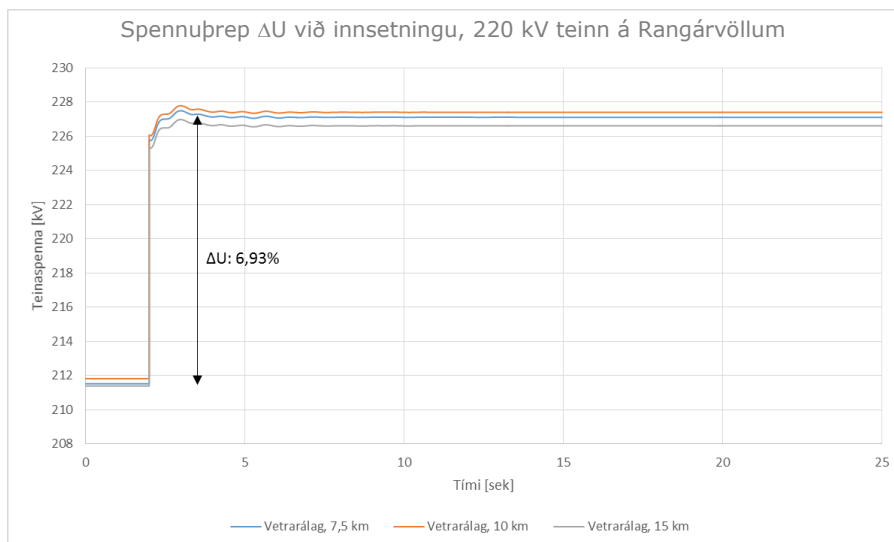
Í greiningum af þessu tagi er mesta áherslan lögð á að skoða stöðugleika í kerfinu við truflanir og hvort spennuþrep, t.d. við innsetningu á loftlínium/strengjum, fari yfir viðmiðunarmörk.

Mestar líkur eru á of háu spennuþrepi eftir spennusetningu á jarðstreng þegar hann er opinn í annan endann. Mynd 4-4 sýnir spennuþrep sem notendur tengdir Rangárvöllum geta orðið fyrir við innsetningu á BL3 við sumarálag:



Mynd 4-4 - Spennuþrep við innsetningu BL3, sumarálag

Niðurstöður sýna að spennuþrepið sem verður á Rangárvöllum við innsetningu á BL3 (rofa á BL3 lokað á Rangárvöllum) er um 5,6% sem er yfir leyfilegum mörkum. Hér sést vel hvað lágt skammhlaupsafl hefur mikil áhrif á spennuþrep við innsetningu á jarðstrengjum. Fyrir Kröflulínu 3 var spennuþrepið 0,4-0,6% við innsetningu, en skammhlaupsaflíð í Fljótsdal er mjög hátt, 2.900 MVA samanborið við 590 MVA á Rangárvöllum. Eins og áður hefur komið fram þá segir skammhlaupsaflíð til um styrk kerfisins, því hærra skammhlaupsafl því sterkara kerfi. Sterkt kerfi verður því fyrir töluvert minni áhrifum við til dæmis spennusetningu á jarðstrengjum og truflanir í kerfinu. Ætla má að koma megi í veg fyrir svo mikið spennuþrep með nákvæmari stillingu á kerfinu, segulmögnun véla, þrep á aflspennum o.s.frv., en samt sem áður má búast við að spennuþrepin verði á bilinu 3-5%.

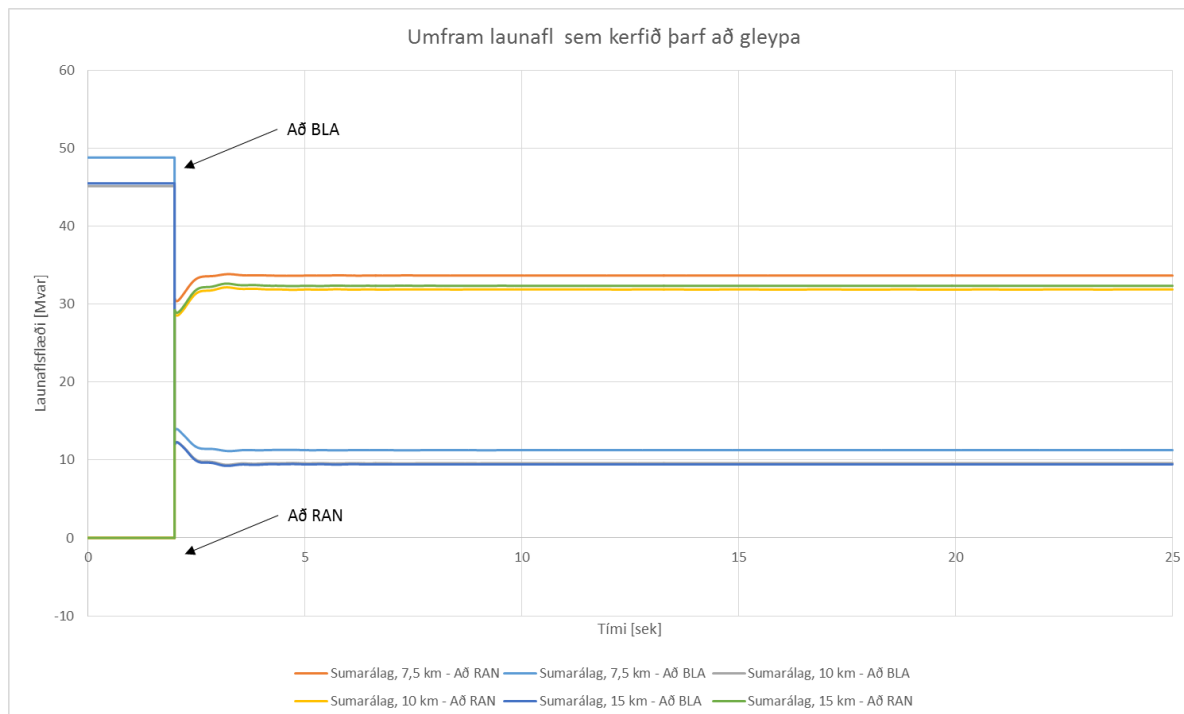


Mynd 4-5 - Spennuþrep við innsetningu BL3, vetrarálág

Mynd 4-5 sýnir spennuþrep sem notendur tengdir Rangárvöllum geta orðið fyrir við innsetningu á BL3 við vetrarálág.

Niðurstöður sýna að spennuþrepið sem verður á Rangárvöllum við spennusetningu frá Blöndu (rofi á BL3 lokað á Rangárvöllum eftir spennusetningu) er um 6,9% sem er nokkuð yfir viðmiðunarmörkum.

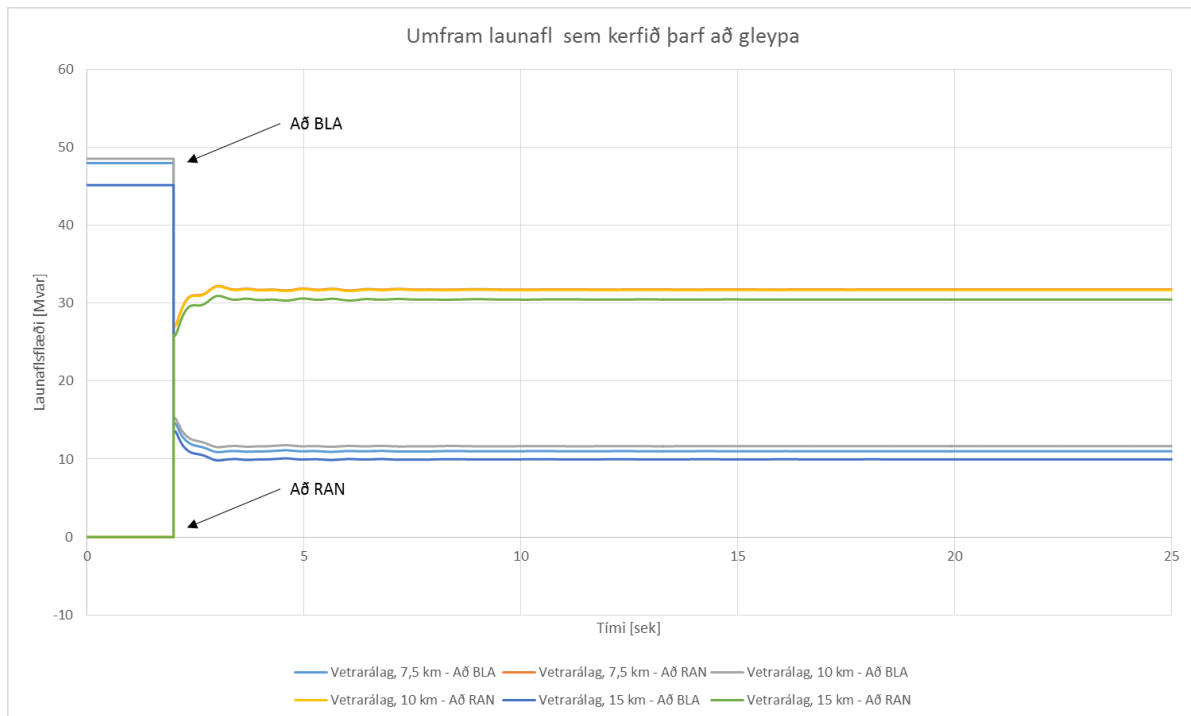
Einnig er áhugavert að skoða umfram launafl sem kerfið þarf að taka á sig, þ.e. það launafl sem útjöfnunarspólurnar gleypa ekki.



Mynd 4-6 - Umfram launafl sem kerfið þarf að taka við frá jarðstrengjum, sumarálág

Mynd 4-6 sýnir það umfram launafl sem flæðir inn á byggðalínuna og kerfið þarf að taka á sig til þess að halda rekstar spennunni innan viðmiðunarmarkna.

Mynd 4-7 sýnir það umfram launafl sem flæðir inn á byggðalínuna sem kerfið þarf að taka á sig til þess að halda rekstaraspennunni innan viðmiðunarmarka.



Mynd 4-7 - Umfram launafl sem kerfið þarf að taka við frá jarðstrengjum, vetrarálag

Niðurstöður á Mynd 4-6 og Mynd 4-7 sýna að umfram launaflíð sem strengirnir framleiða fer allt að Blöndustöð, tæp 50 Mvar, áður en rofanum á Rangárvöllum er lokað. Eftir að rofanum á Blöndulínu 3 á Rangárvöllum er lokað jafnast launaflsfæði út. Launaflsfæði út á byggðalínuna er það sama í öllum tilfellum, þ.e. fyrir 7,5-, 10- og 15 km strengi en það skýrist af því að hlutfallsleg útjöfnunin er sú sama fyrir öll þrjú tilfelli og því ætti umfram launafl sem vélar í kerfinu þurfa að taka á sig að vera svipað hvort sem um 7,5 km, 10 km eða 15 km streng er að ræða.

4.3 Helstu niðurstöður

Nauðsynleg launaflsútjöfnun fyrir 10 km langan jarðstreng, sem hluta af Blöndulínu 3, er um 50% viðmiðið, eða um 50 Mvar. Nauðsynleg launaflsútjöfnun er yfir 50% viðmiðinu fyrir lengri jarðstrengi og því ekki talið mögulegt að hafa svo langa jarðstrengi sem hluta af Blöndulínu 3.

Annað atriði sem takmarkar lagningu jarðstrengs í Blöndulínu 3 er undirsegulmögnun vinnslueininga. Með 10 km löngum streng og 50% útjöfnun eru allar þrjár vélar Blönduvirkjunar í hámarksundirsegulmögnun. Það er rekstrarástand sem ekki er ásættanlegt að staðaldri, samkvæmt því sem áður hefur komið fram um möguleg neikvæð áhrif langvarandi undirsegulmögnunar.

Niðurstöður úr greiningum á kvikri hegðun kerfisins sýna að spennuþrep sem notendur geta orðið fyrir við spennusetningu á línunni getur orðið allt að 7%, sjá Mynd 4-4 og Mynd 4-5. Mögulega væri hægt að stilla kerfið betur áður en innsetning er framkvæmd. Niðurstöðurnar gefa engu að síður hugmyndir um hversu veikt kerfið er milli

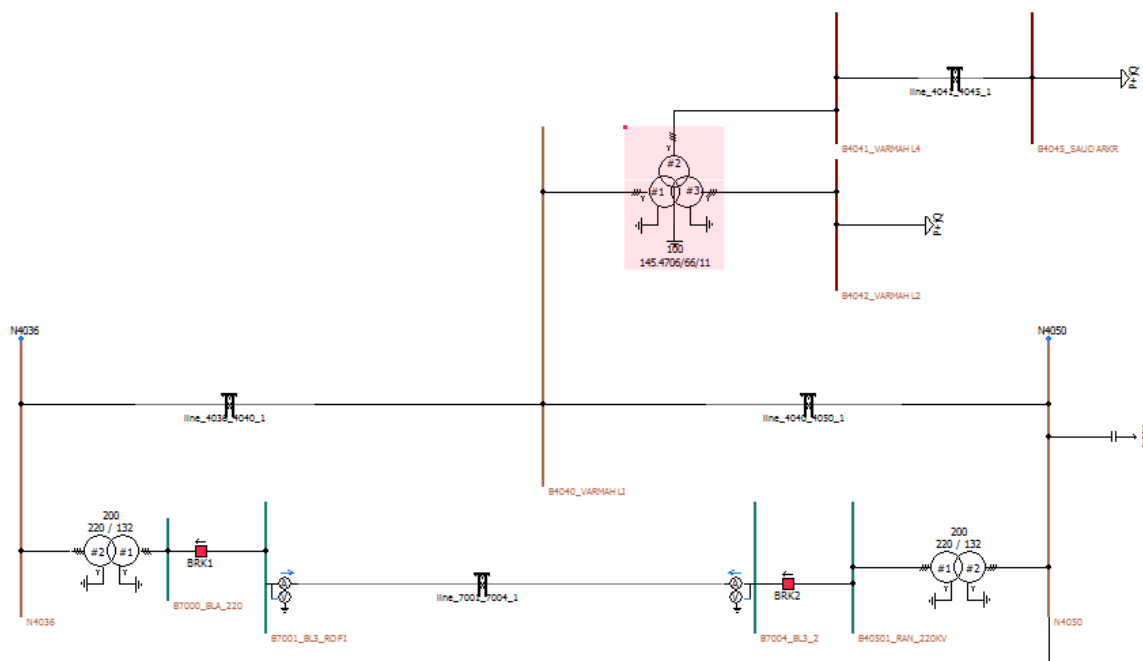
Blöndustöðvar og Rangárvalla og að spennuþrep gætu verið við efri mörk við innsetningu á Blöndulínu 3.

4.4 Greining á svipulli svörun – PSCAD

Í greiningum á svipulli svörun fyrir BL3 er eftirfarandi skoðað:

- Spennusetning frá Rangárvöllum og Blöndu
- Truflun við Rangárvelli

Jafngildislíkani var stillt upp í PSCAD byggt á PSS®E sumar tilfellum fyrir loftlínu alla leið annarsvegar og 10 km langan jarðstreng næst Rangárvöllum hins vegar (sjá Mynd 4-8). Við gerð jafngildislíkansins var notast við E-Tran forritið sem les inn hráskrár frá PSS®E og útbýr jafngildislíkan sjálfvirkt. Til að staðfesta að líkanið endurspeglaði PSS®E líkanið var skammhlaupsstraumur reiknaður fyrir 132 kV tein í Blöndu og á Rangárvöllum. Í Blöndu var skammhlaupsstraumur (Steady state) 4,9 kA í PSS®E með IEC 60909 aðferðinni en í PSCAD var skammhlaupsstraumurinn 4,84 kA. Fyrir Rangárvelli var skammhlaupsstraumurinn 3,8 kA í PSS®E og 3,6 kA í PSCAD.



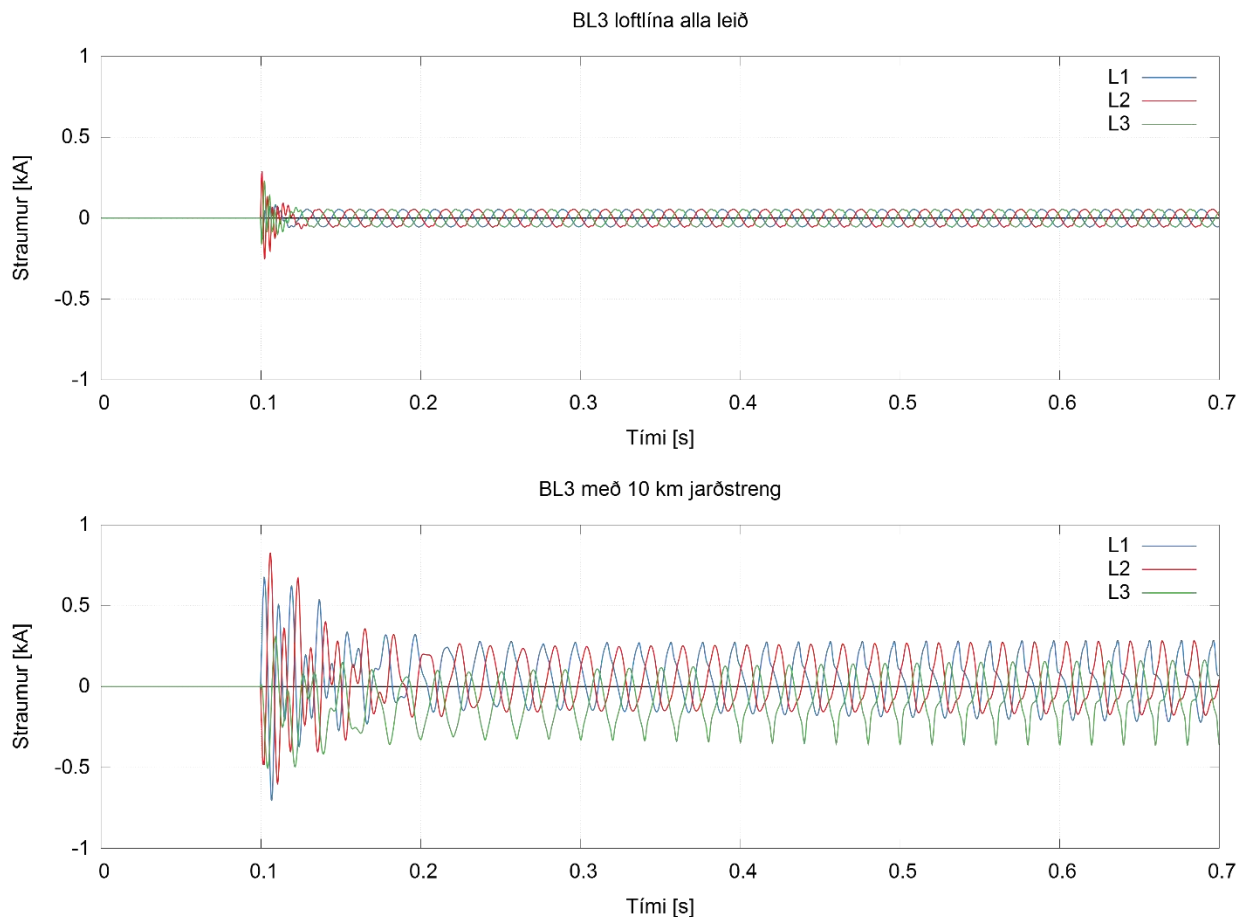
Mynd 4-8 - Mynd af jafngildislíkani í PSCAD með BL3 sem loftlínu alla leið milli Blöndu og Rangárvalla

4.4.1 Spennusetning Blöndulínu 3

Spennusetning Blöndulínu 3 frá Rangárvöllum og Blöndu var skoðuð með og án jarðstreng næst Rangárvöllum. Tekið var tillit til mettnar 220/132 kV spenna en gert var ráð fyrir að þeir hefðu verið spennusettir áður en línan er spennuð.

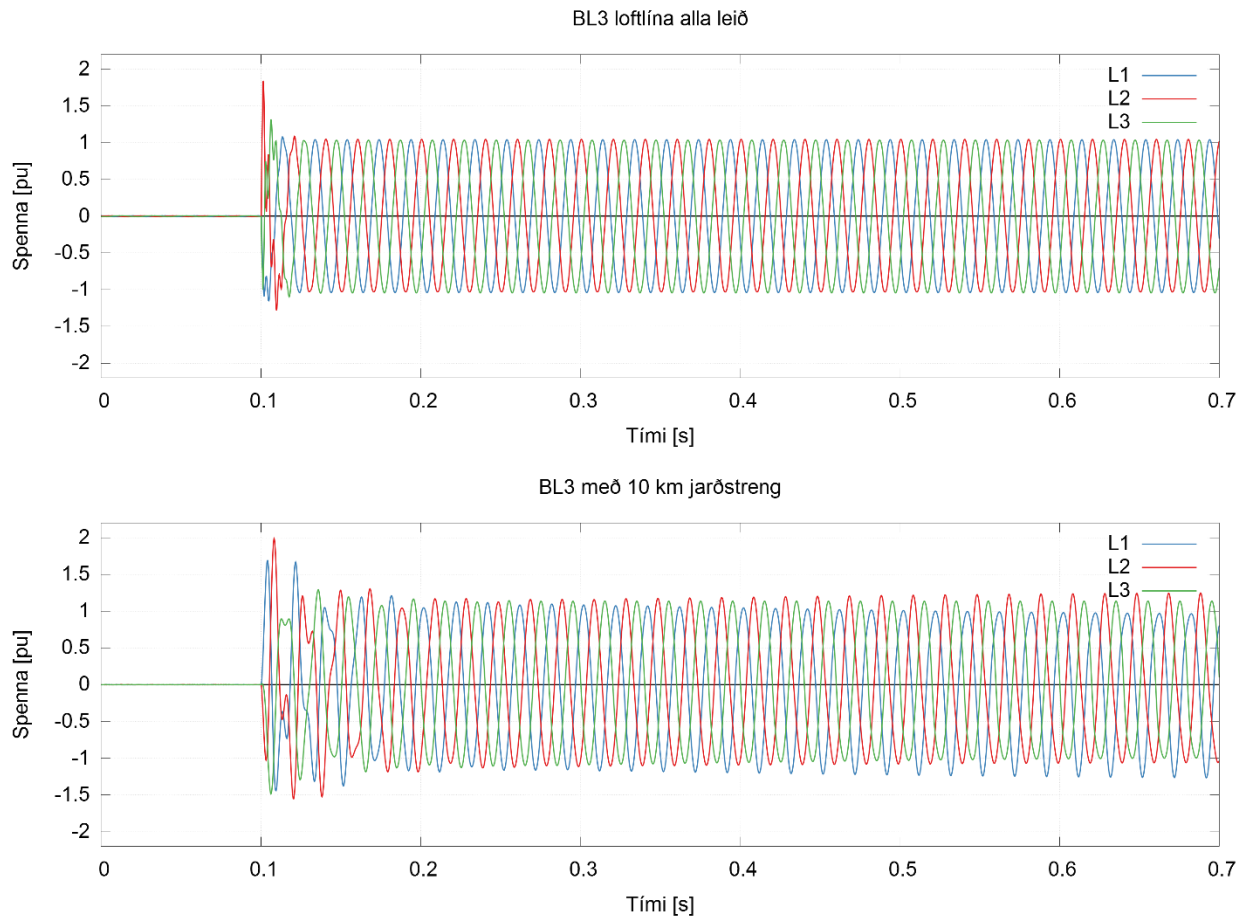
Mynd 4-9 sýnir innhleypistraum BL3 við spennusetningu frá Blöndu. Þegar BL3 er lögð sem loftlína alla leið er útslag innhleypistraums u.þ.b. 250 A. Þegar 10 km hluti hennar

er lagður í jörðu eykst útslag innhleyppstraums talsvert og verður u.þ.b. 800 A. Fyrir BL3 sem loftlína alla leið nær hleðslustráumur línunnar jafnvægi eftir u.þ.b. 10 ms. Fyrir línu með 10 km jarðstreng næst Rangárvöllum þá tekur lengri tíma fyrir strauminn að ná jafnvægi. Bylgjuformið er einnig mjög þjagað með takmarkaðan núllgegnungang við spennusetningu og því erfitt að segja til um hvort auka megi launaflsútfjöfnun.



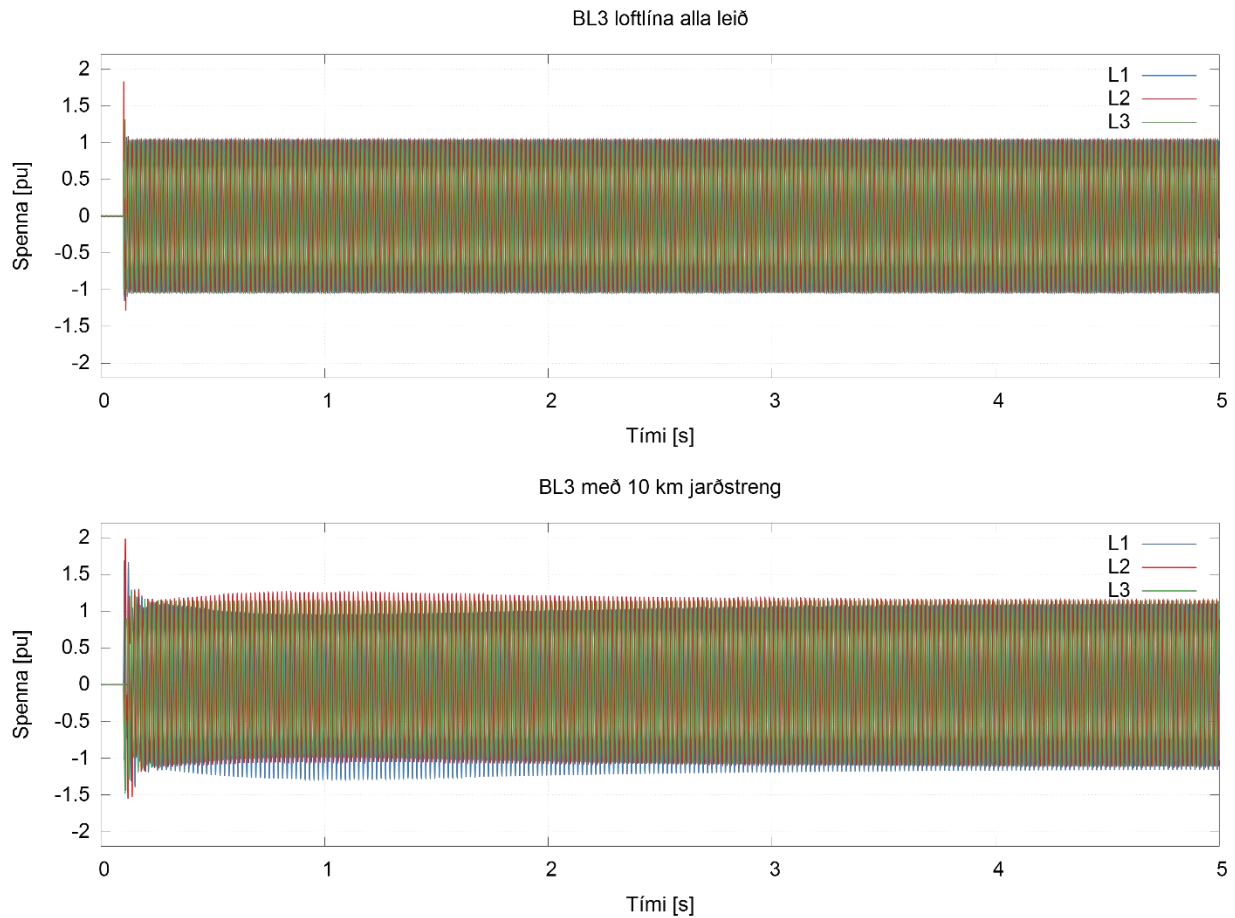
Mynd 4-9 - Innhleyppstraumur við spennusetningu BL3 frá Blöndu

Mynd 4-10 sýnir spennu við opinn enda línu við spennusetningu frá Blöndu. Fyrir BL3 byggða sem loftlínu alla leið verður útslag spennu u.þ.b. 1,75 pu og dempast á u.þ.b. 10 ms. Við spennusetningu línu með 10 km jarðstreng næst Rangárvöllum verður útslag spennu u.þ.b. 2 pu. Yfirspennurnar dempast á u.þ.b. 50 ms. Eftir það má sjá hvernig spennan „bólgnar“ vegna örvunar samhliða meðsvæiflutíðni.



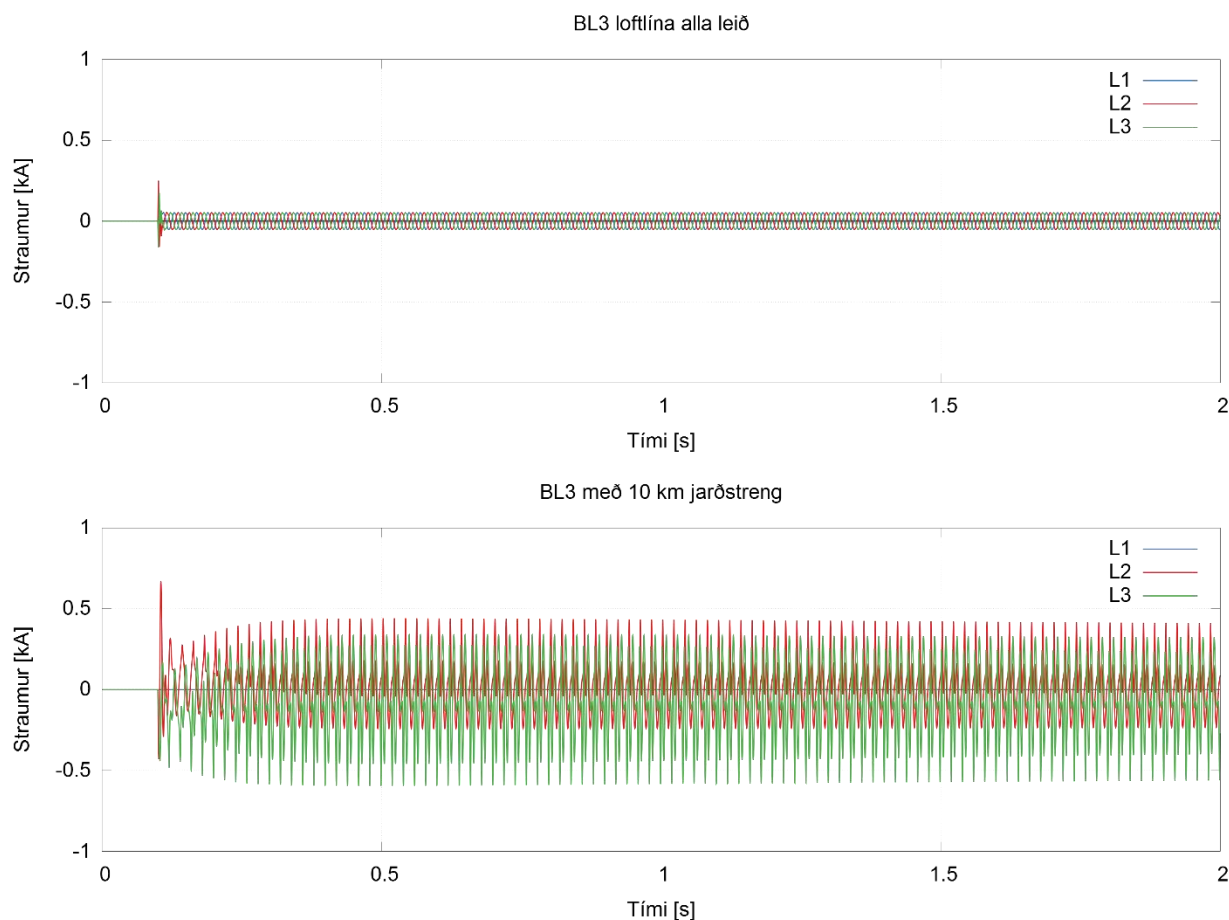
Mynd 4-10 - Spennur við opinn enda BL3 við spennusetningu frá Blöndu

Mynd 4-11 sýnir þróun spennunnar eftir spennusetningu og má sjá hvernig spennan rís og nær hámarki u.þ.b. 1 s seinna og nær ekki jafnvægisástandi fyrr en eftir 5 s. Rofyfirspenna og tímabundin yfirspenna eru undir viðmiðunarmörkum (2,5 pu og 1,6 pu) við spennusetningu frá Blöndu.



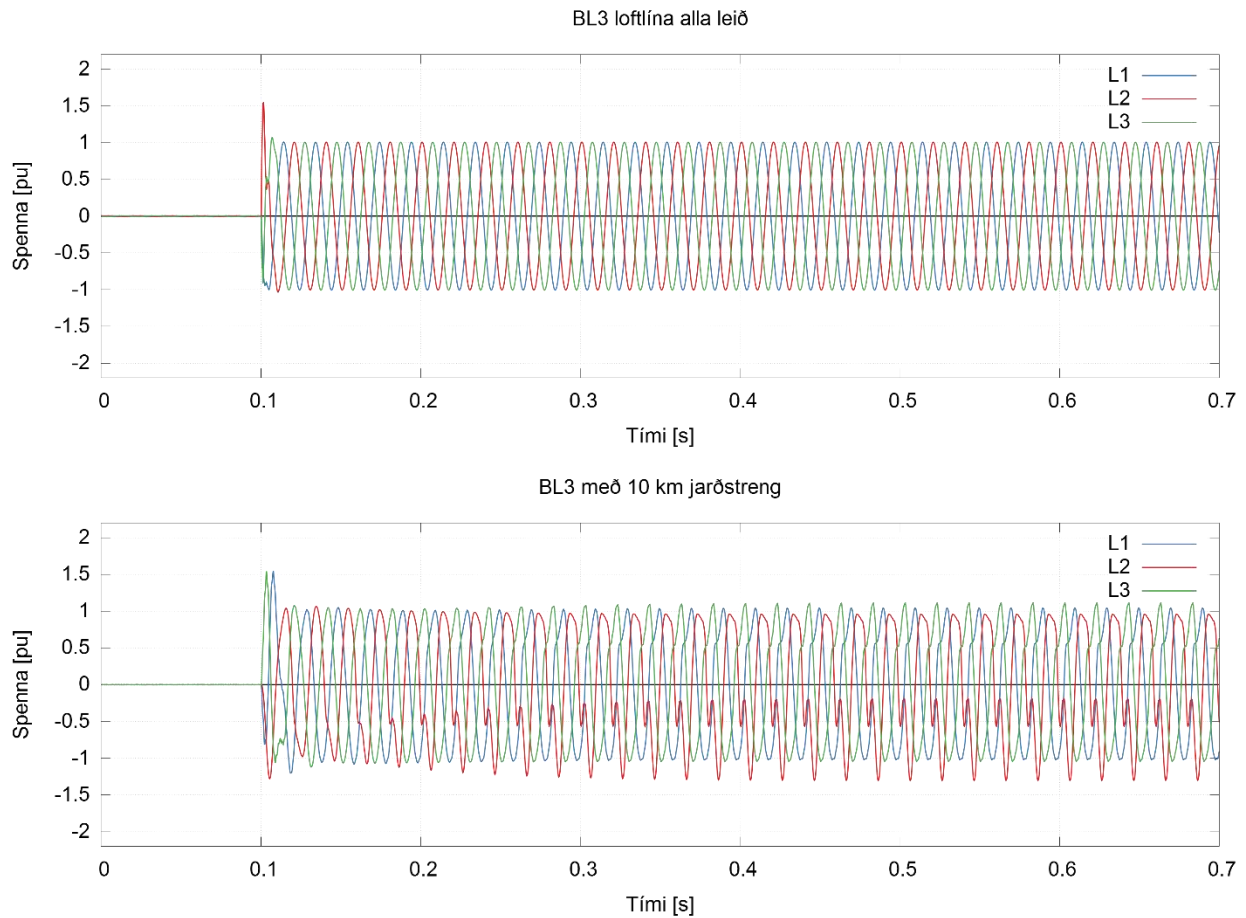
Mynd 4-11 - Spennur við opinn enda BL3 við spennusetningu frá Blöndu 0-5 s

Mynd 4-12 sýnir innhleypistraum við spennusetningu BL3 frá Rangárvöllum. Útslag innhleypistraums við spennusetningu BL3 sem loftlínu alla leið er u.þ.b. 250 A sem er svipað og fyrir spennusetningu frá Blöndu. Innhleypistraumur við spennusetningu þar sem hluti BL3 er jarðstrengur er lægri (u.þ.b 650 A) en við spennusetningu frá Blöndu (800 A). Líkleg skýring á því er munur á skammhlaupsafli á milli 132 kV teina á Rangárvöllum og í Blöndu. Hinsvegar má sjá hvernig innhleypistraumurinn „bólgnar“ hratt út eftir spennusetningu vegna örvunar á meðsveiflutíðni kerfisins þegar hluti BL3 er lagður sem strengur.



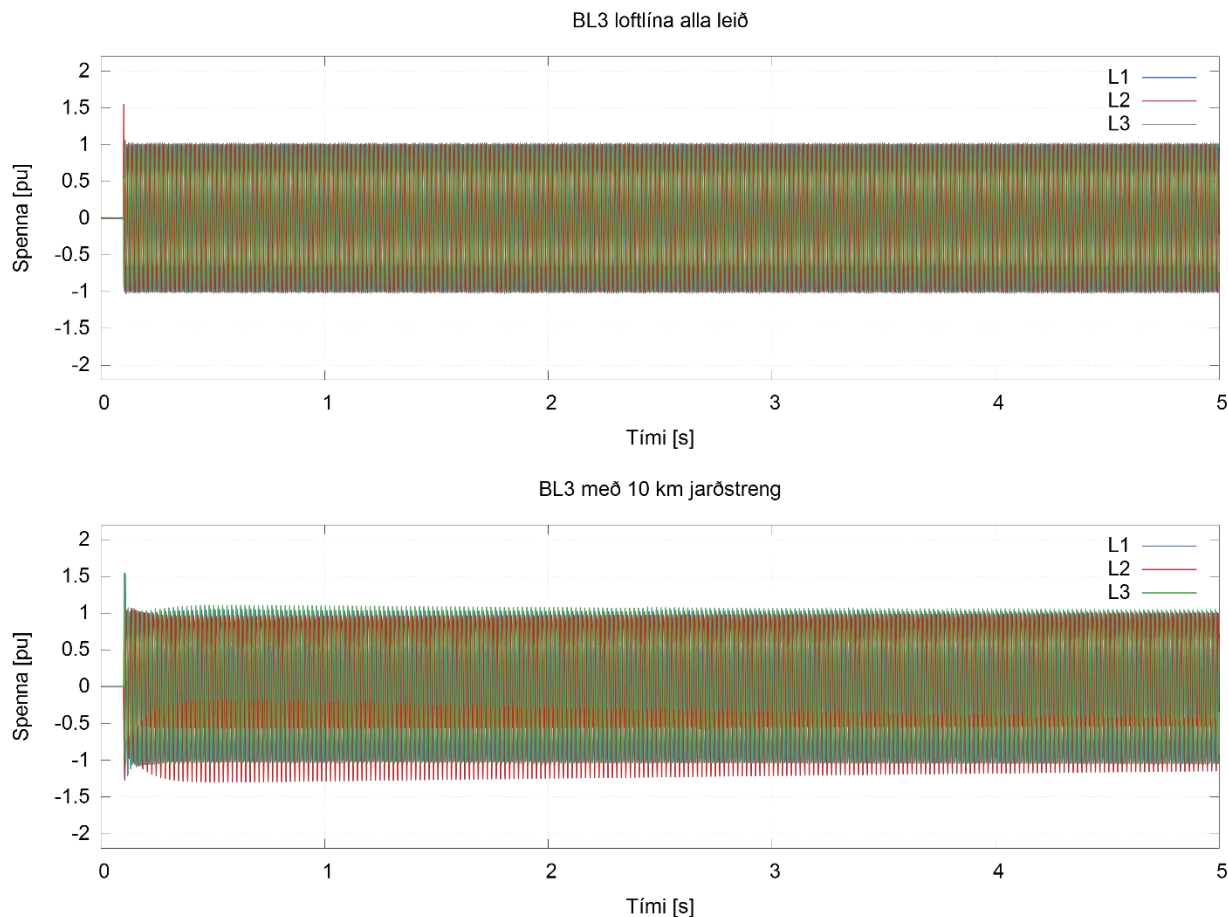
Mynd 4-12 - Innhleyppistraumur við spennusetningu BL3 frá Rangárvöllum

Mynd 4-13 sýnir spennur við opinn enda BL3 við spennusetningu frá Rangárvöllum. Hámarksútslag við spennusetningu er 1,5 pu bæði fyrir loftlínu alla leið og þegar 10 km hluti er lagður í jörðu næst Rangárvöllum. Við spennusetningu loftlínu dempast spenna hratt og nær stöðugu ástandi á undir u.þ.b. 10 ms. Þegar hluti er lagður í jörðu myndast tímabundin yfirspenna nálægt 1,4 pu í útslagi.



Mynd 4-13 - Spennur við opinn enda BL3 við spennusetningu frá Blöndu

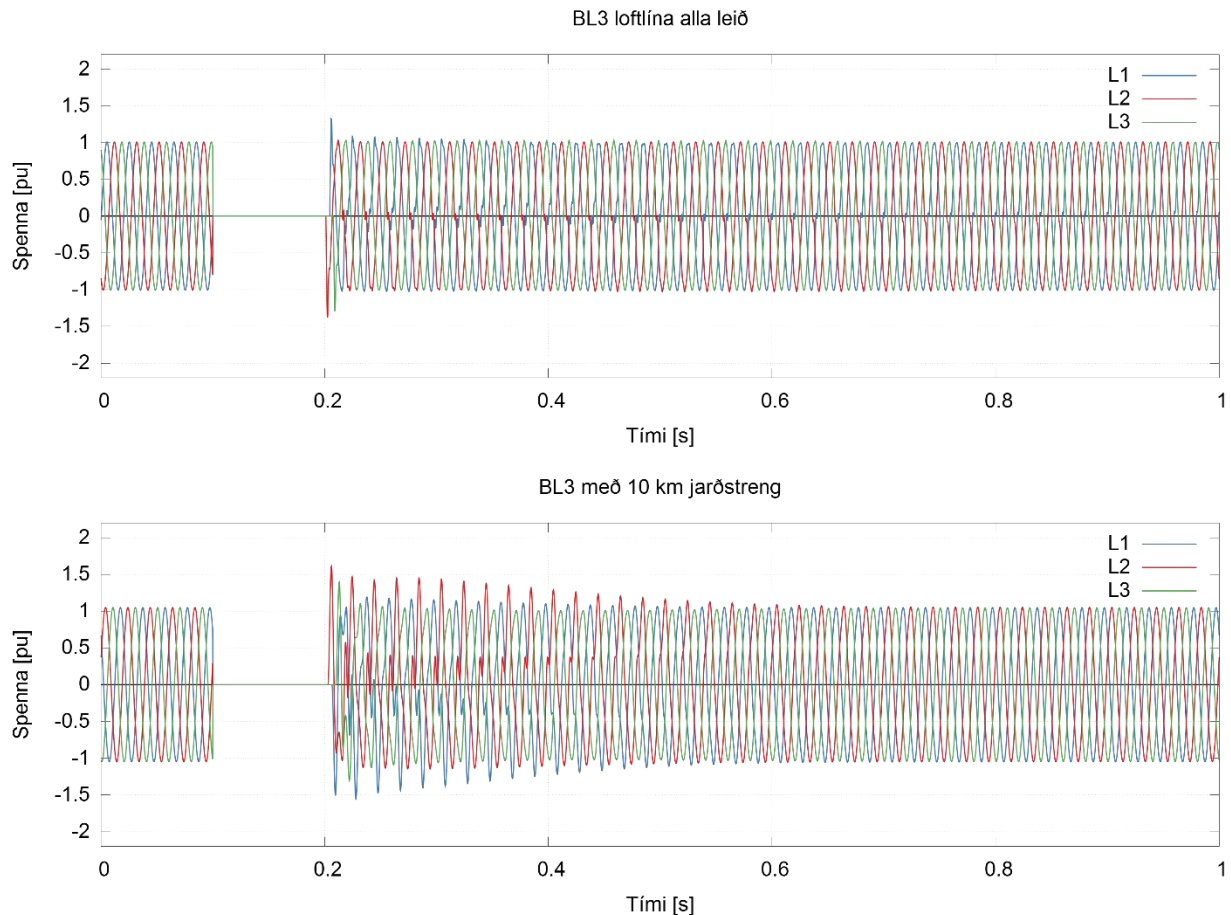
Mynd 4-14 sýnir að tímabundna yfirspennan dempast ekki fyrr en eftir u.þ.b. 5 s sem er minni dempun en fyrir spennusetningu frá Blöndu. Rofyfirspenna og tímabundin yfirspenna eru undir viðmiðunarmörkum (2,5 pu og 1,6 pu) við spennusetningu frá Rangárvöllum og takmarka því ekki strenglengd.



Mynd 4-14 - Spennur við opinn enda BL3 við spennusetningu frá Rangárvöllum 0-5 s

4.4.2 Truflun við Rangárvelli

Tímabundnar yfirsveiflur sem myndast við truflun á teini á Rangárvöllum voru skoðaðar fyrir BL3 sem loftlína alla leið og þegar 10 km hluti hennar næst Rangárvöllum er lagður í jörðu. Þriggja fasa truflun er sett á tein í Rangárvöllum í 100 ms og svo fjarlægð. Mynd 4-15 sýnir yfirspennur sem verða við truflun á 220 kV teini í Rangárvöllum. Við truflun þegar BL3 er lögð sem loftlína alla leið er útslag spennunnar u.þ.b. 1,3 pu í útslagi og tímalengd er 10 ms. Þegar 10 km hluti BL3 er lagður í jörðu verður mesta útslag spennu u.þ.b. 1,6 pu og yfirspennan er ekki orðin fulldempuð fyrr en eftir 300 ms. Tímabundin yfirspenna er því um eða yfir viðmiðunarmörkum tímabundinna yfirspenna við truflun við Rangárvelli.



Mynd 4-15 - Tímabundnar yfirspennur sem myndast við truflun á 220 kV teini á Rangárvöllum

4.4.3 Niðurstöður svipullar greiningar

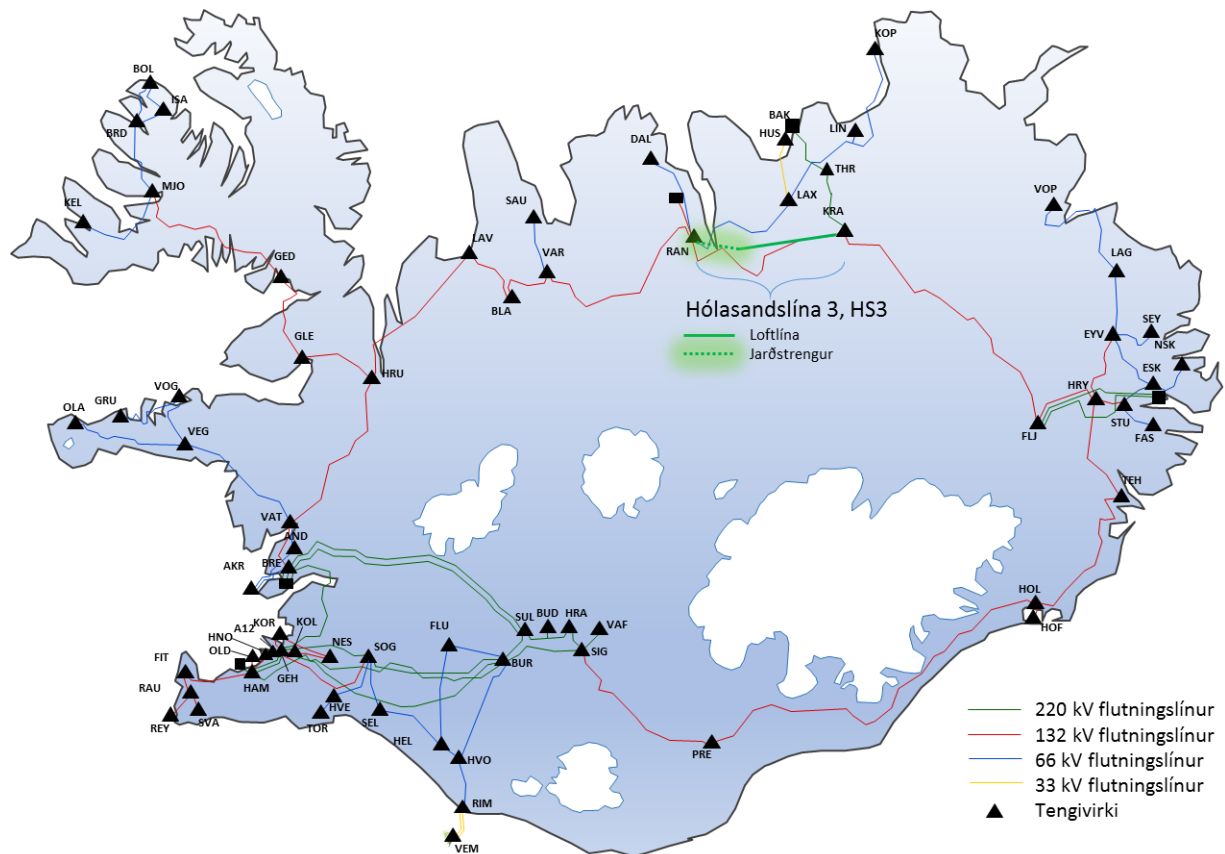
Útreikningar á spennusetningu BL3 með 10 km jarðstreng sýna að tímabundnar yfirspennur myndast sem standa yfir í langan tíma. Þetta á við um spennusetningu frá Blöndu og frá Rangárvöllum. Jafnframt sýna útreikningar að við truflun á Rangárvöllum með 10 km jarðstreng myndast tímabundin yfirspenna með útslag 1,6 pu sem stendur yfir í 300 ms. Tímabundin yfirspenna er um og yfir viðmiðunarmörkum og takmarkar því strenglengd.

Niðurstöður greininganna gefa til kynna að ekki sé mögulegt að leggja lengri en 10 km streng í BL3 næst Rangárvöllum miðað við gefnar forsendur.

Tímabundnar yfirspennur sem standa lengi yfir geta skaðað yfirspennuvara í nágrenni tengivirkisins. Mögulegt er að velja yfirspennuvara sem þola slíka yfirspennur eða sem leiða straum við hærri yfirspennur en þá getur verið áskorun að tryggja einangrunarsamhæfni í kerfinu.

5 Hólasandslína 3 (HS3)

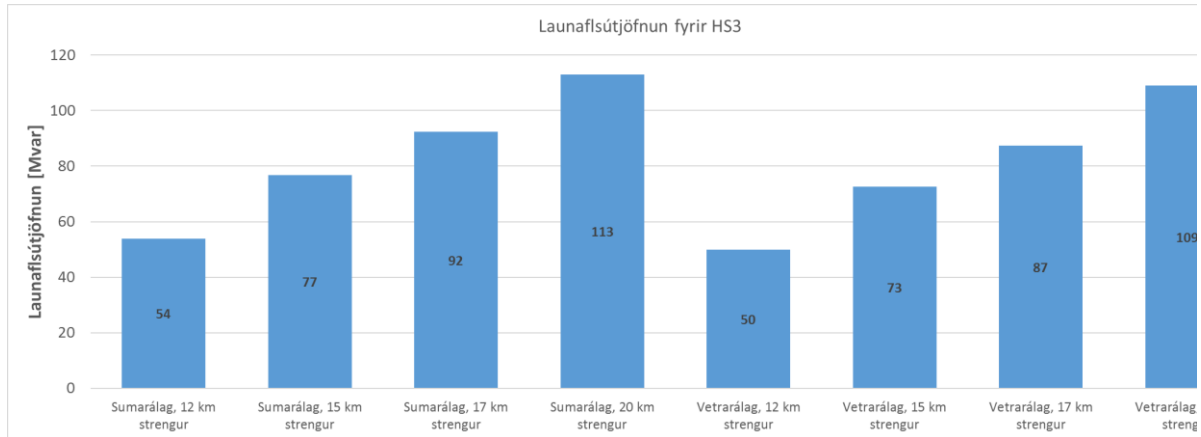
Í þessari skýrslu er heitið Hólasandslína 3 notað yfir 220 kV línu sem fyrirhugað er að byggja milli Rangárvalla og Kröflu (eða Hólasands). Mynd 5-1 sýnir leið línunnar á „skematískan“ hátt. Í greiningunni er gert ráð fyrir því að jarðstrengshlutinn sé næst Rangárvöllum.



Mynd 5-1 - Flutningskerfi Landsnets, með Hólasandslínu 3 teiknaða inn á

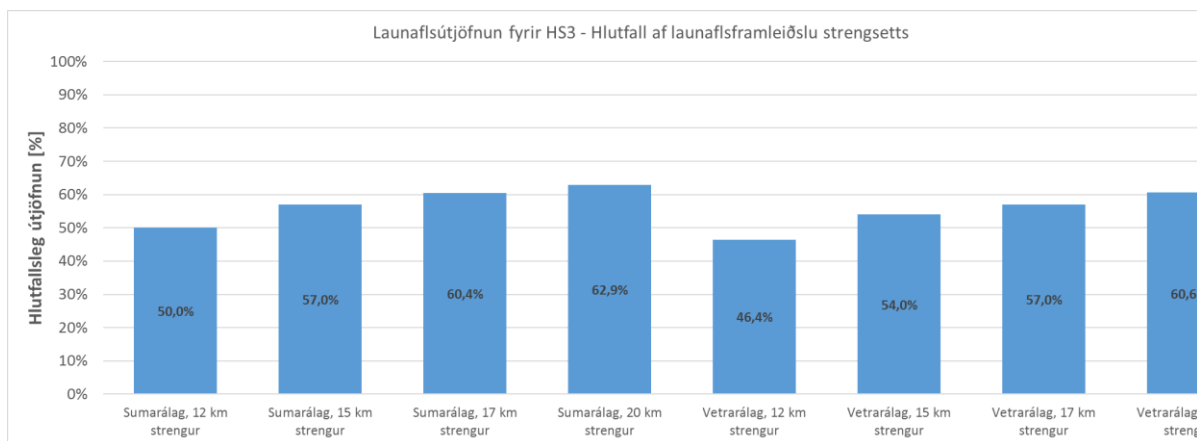
5.1 Launafslúttjöfnun – Afíflæðigreining - PSS®E

Gerðar voru hermanir með fjórum lengdum á jarðstrengjum fyrir Hólasandslínu 3; 12 km, 15 km, 17 km og 20 km, ásamt tveimur álagstílfellum, sumarálág og vetrarálág. Mynd 5-2 sýnir úttjöfnunarpörf [Mvar] fyrir Hólasandslínu 3 þegar línuhlutinn næst Rangárvöllum er lagður í jörðu:



Mynd 5-2 - Samanburður á nauðsynlegri launafslúttjöfnun, sumar- og vetrarálág, fyrir mismunandi jarðstrengslengdir í HS3

Mynd 5-3 sýnir hlutfallslega úttjöfnun fyrir tilfelli á Mynd 5-2:



Mynd 5-3 - Hlutfallsleg úttjöfnun fyrir HS3

Niðurstöður sýna að hlutfallsleg úttjöfnun er yfir 50% þegar jarðstrengshlutinn í HS3 fer yfir 12 km að lengd. Þetta er þó háð álagi í kerfinu, þar sem rekstrarspennan í léttlestuðu kerfi (sumarálág) getur verið töluvert hærri en í mikið lestuðu kerfi (vetrarálág), auk þess sem launtöp línunnar eru háð straumnum í öðru veldi. Samt sem áður má þó áætla að ekki sé mögulegt að hafa jarðstrenginn mikið lengri en 12 km til að halda sig innan marka hvað varðar launafslúttjöfnun. Úttjöfnunarpörfin í því tilviki er um 50 Mvar.

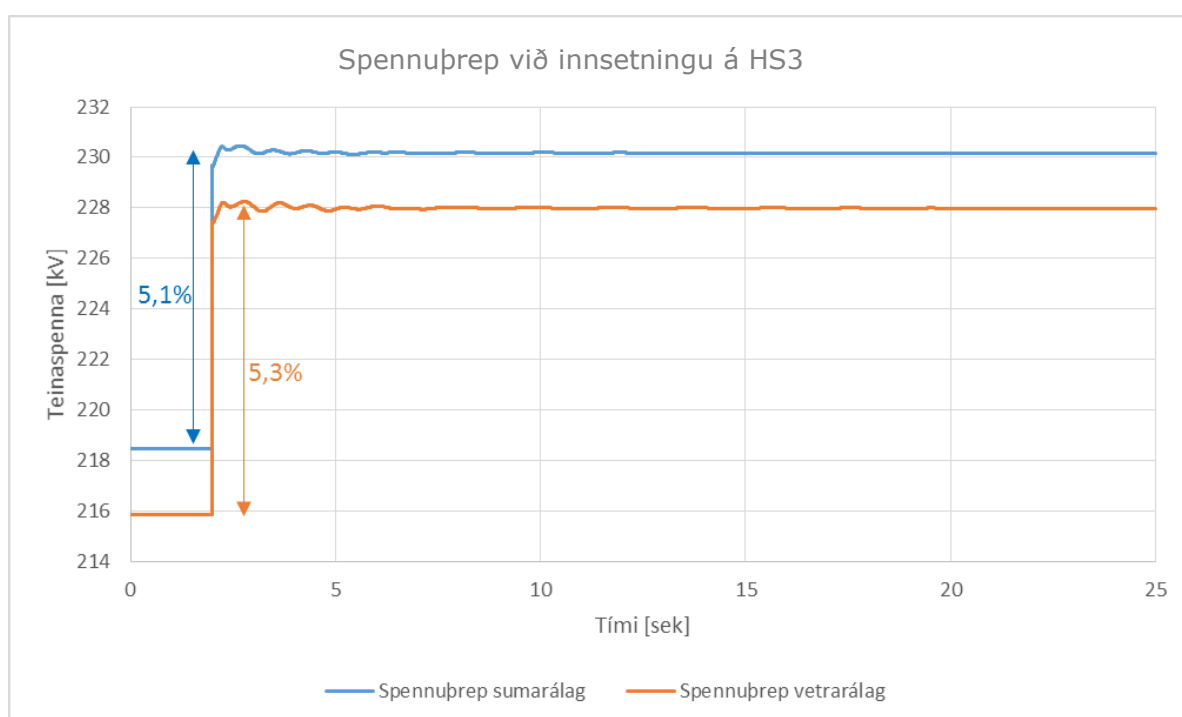
5.2 Stöðugleiki og spennuþrep – Greining á kvikri hegðun - PSS®E

Gerðir eru útreikningar á kvikri hegðun flutningskerfisins við mismunandi aðstæður. Kerfinu er stillt upp með sumarálagi þar sem einhverjar vinnslueiningar eru úti og álag

frekar lítið annars vegar og dæmigerðu vetrartilviki hins vegar þar sem álag er hátt og allar vinnslueiningar inni. Skoðað er spennuþrep sem verður á Rangárvöllum við það að rofa fyrir HS3 er lokað þar eftir að línan hefur verið spennusettt frá Kröflu. Skoðuð er svörun kerfisins með 12 km af jarðstreng með 50 Mvar útjöfnun.

Í greiningum af þessu tagi er mesta áherslan lögð á að skoða stöðugleika í kerfinu við truflanir og hvort spennuþrep, t.d. við innsetningu á loftlínunum/strengjum, fari yfir viðmiðunarmörk. Einnig er áhugavert að skoða umfram launafslæði frá strengjunum sem útjöfnunarspólurnar ná ekki að jafna út.

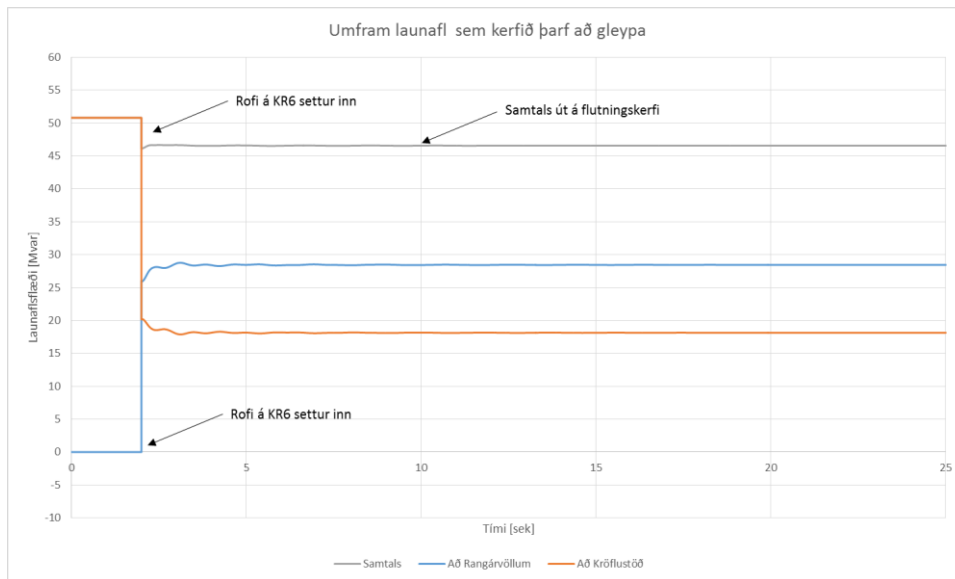
Mestar líkur á of háu spennuþrepi eru við spennusetningu á jarðstreng þegar hann er opinn í annan endann. Mynd 5-4 sýnir spennuþrep á Rangárvöllum sem notendur geta orðið fyrir við innsetningu á HS3 í léttlestuðu kerfi annars vegar og þunglestuðu kerfi hinsvegar.



Mynd 5-4 - Spennuþrep á Rangárvöllum við innsetningu HS3, sumar- og vetrarálág. 12 km jarðstrengur

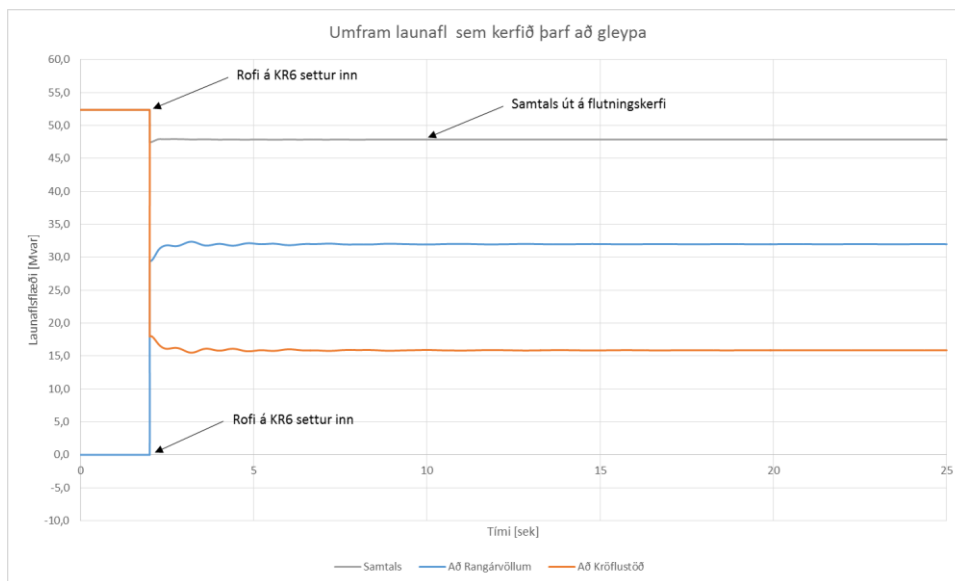
Niðurstöður sýna að spennuþrep á Rangárvöllum við innsetningu á HS3 getur orðið á bilinu 5-5,3%, en það er þó háð stöðu kerfisins hverju sinni, þ.e. hvaða vinnslueiningar eru inni, er þéttavirki á Rangárvöllum inni o.s.frv. Engu að síður sýna niðurstöður að kerfið á Rangárvöllum er fremur veikt, aðallega vegna lágs skammhlaupsafis, og því líkur á að erfitt geti reynst að spennusetja HS3 ef frekari styrkingar koma ekki til.

Mynd 5-5 sýnir það umfram launafli, í léttlestuðu kerfi, sem flæðir inn á byggðalínuna sem kerfið þarf að taka við til þess að halda rekstar spennunni innan viðmiðunarmarka.



Mynd 5-5 - Umfram launafl sem kerfið þarf að taka við frá jarðstrengjum, sumarálág

Mynd 5-6 sýnir það umfram launafl, í þungt lestuðu kerfi, sem flæðir inn á byggðalínuna sem kerfið þarf að taka við til þess að halda rekstar spennunni innan viðmiðunarmarka.



Mynd 5-6 - Umfram launafl sem kerfið þarf að taka við frá jarðstrengjum, vetrarálag

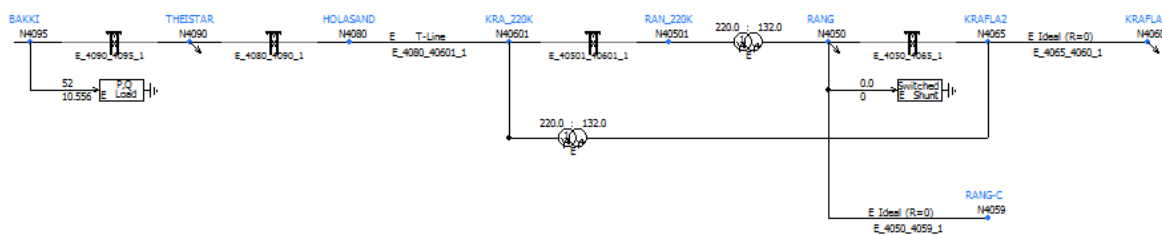
Niðurstöður á Mynd 5-5 og Mynd 5-6 sýna að umfram launaflið sem strengirnir framleiða fer allt að Kröflustöð, rétt rúm 50 Mvar, áður en rofanum á HS3 er lokað á Rangárvöllum. Eftir að rofanum á Hólasandslínu 3 á Rangárvöllum er lokað flæðir launaflið í báðar áttir, en þó töluvert meira að Rangárvöllum. Helsta skýringin á því er sú að línuhlutinn næst Rangárvöllum (fyrstu 12 km) er jarðstrengur og fer launaflið því stystu leið að Rangárvöllum (styttri raffræðileg vegalengd/lægra viðnám).

5.3 Greining á svipulli svörun – PSCAD

Í greiningum á svipulli svörun fyrir HS3 er eftirfarandi skoðað:

- Spennusetning frá Rangárvöllum og Blöndu
- Truflun við Rangárvelli

Líkani af 220 kV loftlínu á milli Kröflu og Rangárvalla (HS3) var stillt upp í PSCAD og jafngildisrafalar reiknaðir fyrir teina tengivirkja við Kröflu og við Rangárvelli (sjá Mynd 5-7). Samkvæmt útreikningum í PSS®E er skammhlaupsstraumur í Kröflu 1,992 kA en í PSCAD er 1,894 kA. Í Kröflu er skammhlaupsstraumur 2,35 kA samkvæmt PSS®E en í PSCAD er það 2,29 kA.

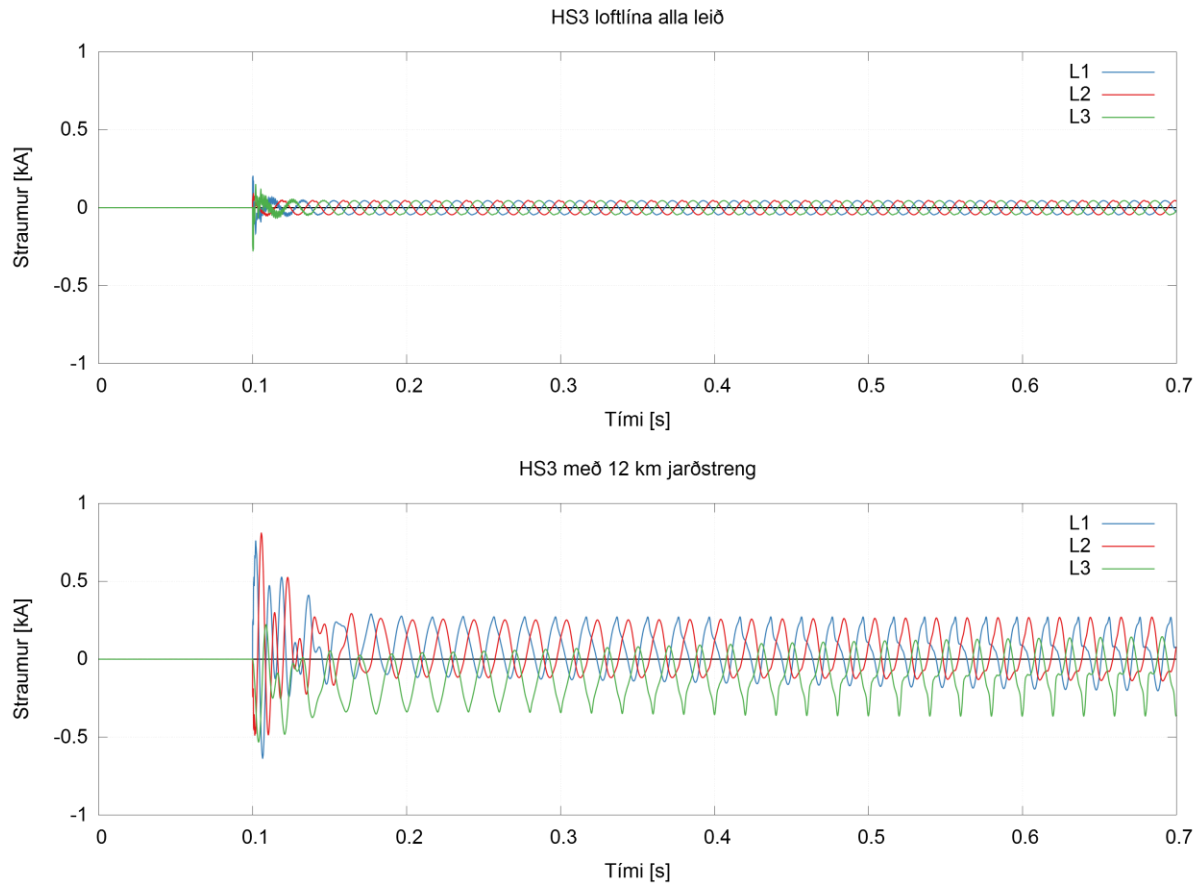


Mynd 5-7 - Mynd af jafngildislíkani í PSCAD með loftlínu alla leið

5.3.1 Spennusetning Hólasandslínu 3

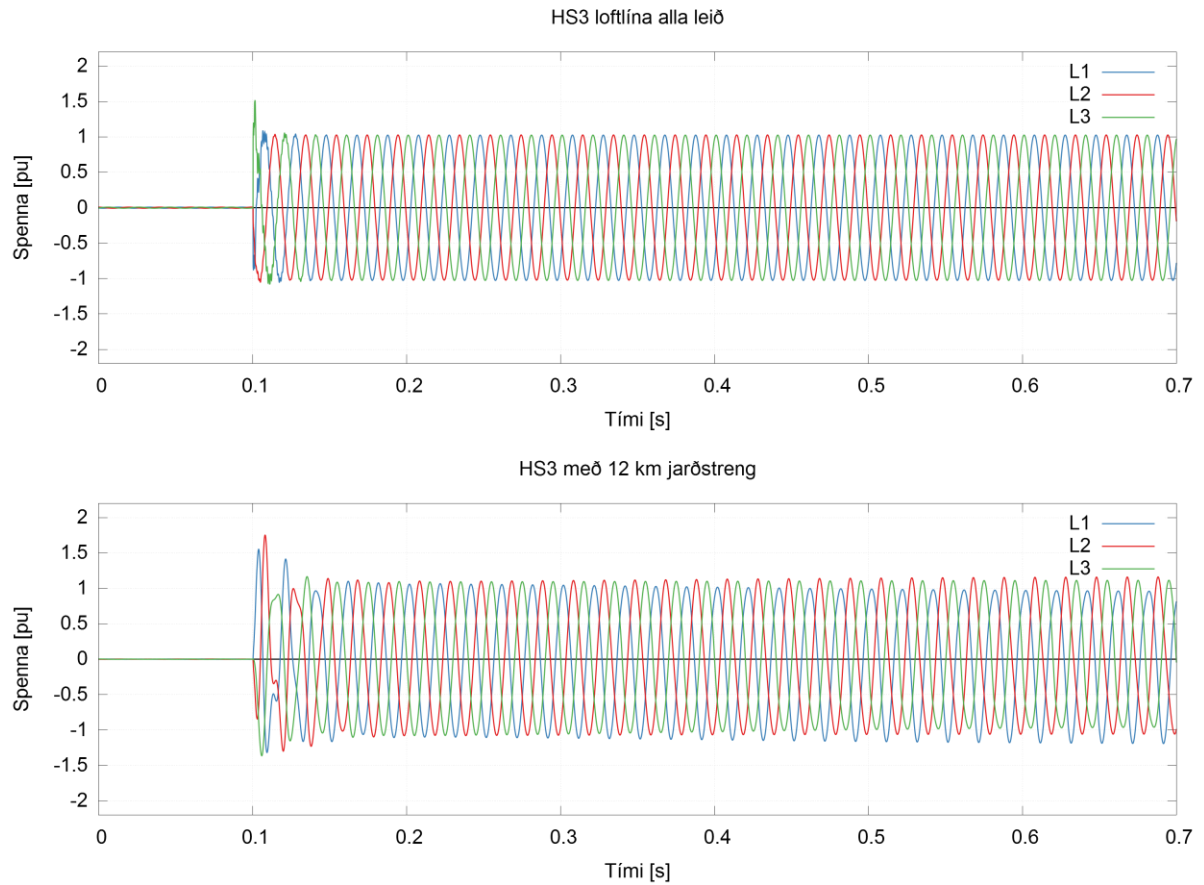
Spennusetning HS3 frá Rangárvöllum og Kröflu var skoðuð.

Mynd 5-8 sýnir innhlepstraum við spennusetningu HS3 sem loftlínu og þegar 12 km hluti hennar hefur verið lagður í jörðu næst Rangárvöllum. Hámarks innhlepstraumur þegar HS3 er eingöngu byggð sem loftlína er u.þ.b. 0,2 kA. Innhlepstraumurinn er vel dempaður og varir í u.þ.b. 30 ms. Innhlepstraumur þegar hluti línunnar er lagður sem jarðstrengur er mun hærri (0,75 kA). Innhlepstraumurinn, þegar hluti er lagður sem jarðstrengur, er ekki búinn að ná jafnvægi eftir 0,6 s og er jafnframt mjög bjagaður.

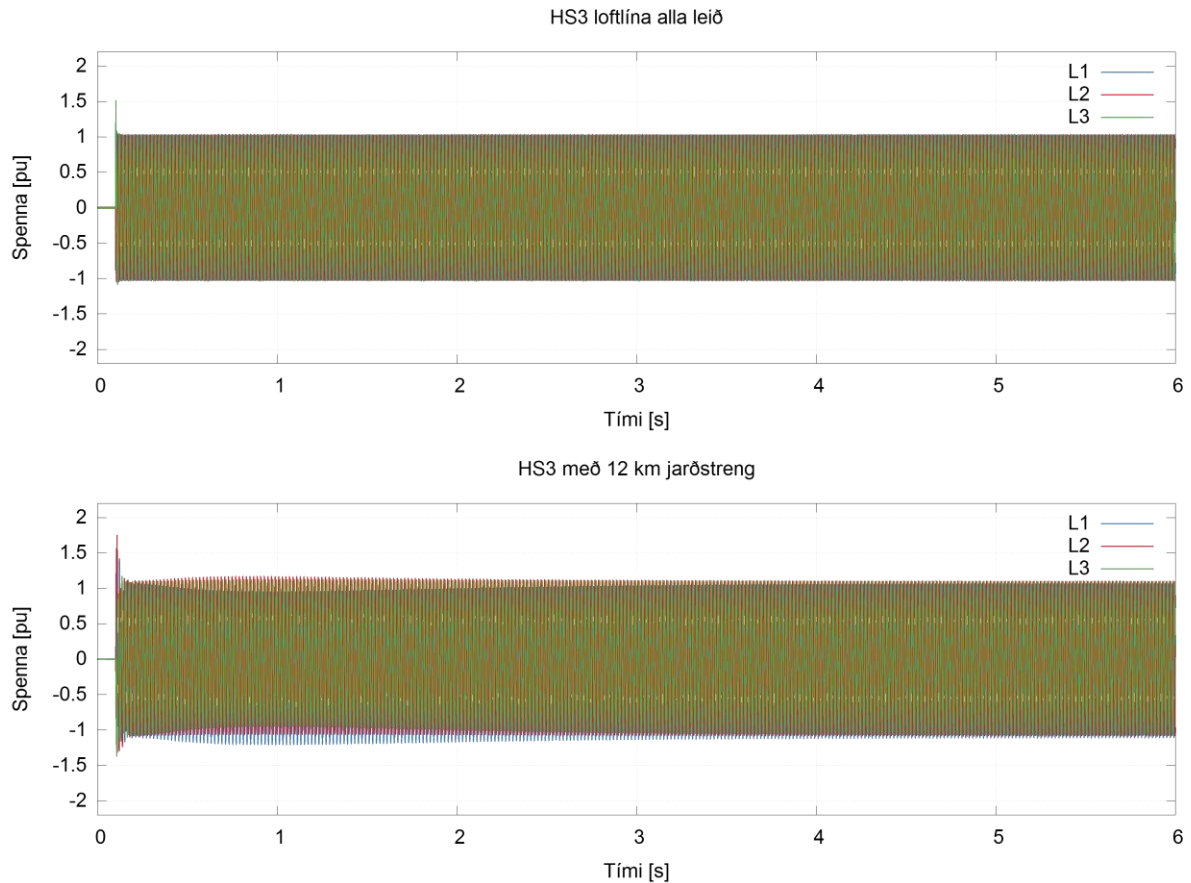


Mynd 5-8 - Innhleypistraumur við spennusetningu HS3 frá Kröflu

Á Mynd 5-9 má sjá spennu við opinn enda sem myndast við spennusetningu loftlínunnar. Útslag spennu við spennusetningu fyrir loftlínu er 1,5 pu og fyrir jarðstreng 1,65 pu. Yfirspenna vegna spennusetningar loftlínu dempast hraðar út en þegar hluti línunnar er lagður sem jarðstrengur. Þegar HS3 er spennusettt frá Kröflu má sjá hvernig mögnun verður á spennu vegna örvunar samhliða sveiflutíðni. Útslag þessarar tímabundnu yfirspenna nær u.þ.b. 1,2 pu og varir í 3 s (Mynd 5-10). Tímabundin yfirspenna er um og yfir viðmiðunarmörkum og takmarkar strenglengd.

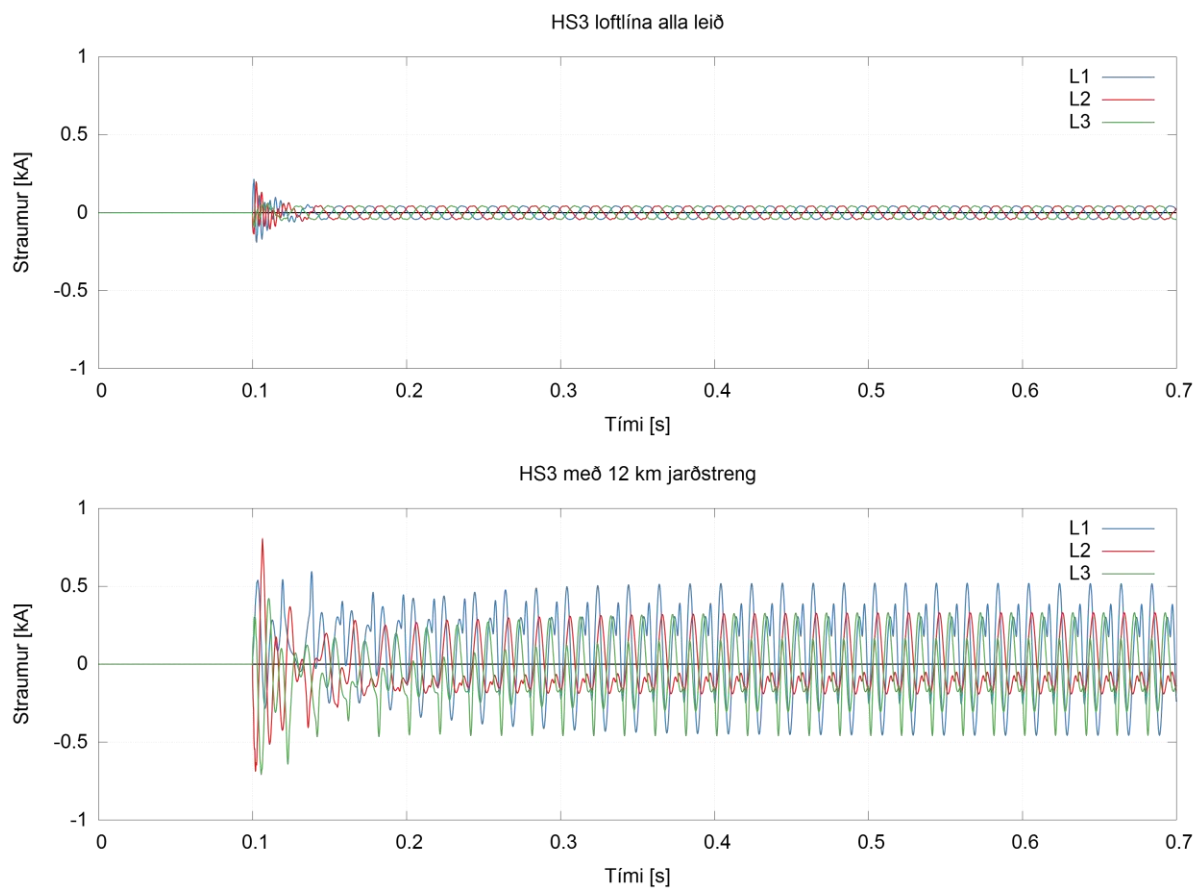


Mynd 5-9 - Spennur við opinn enda við spennusetningu HS3 frá Kröflu



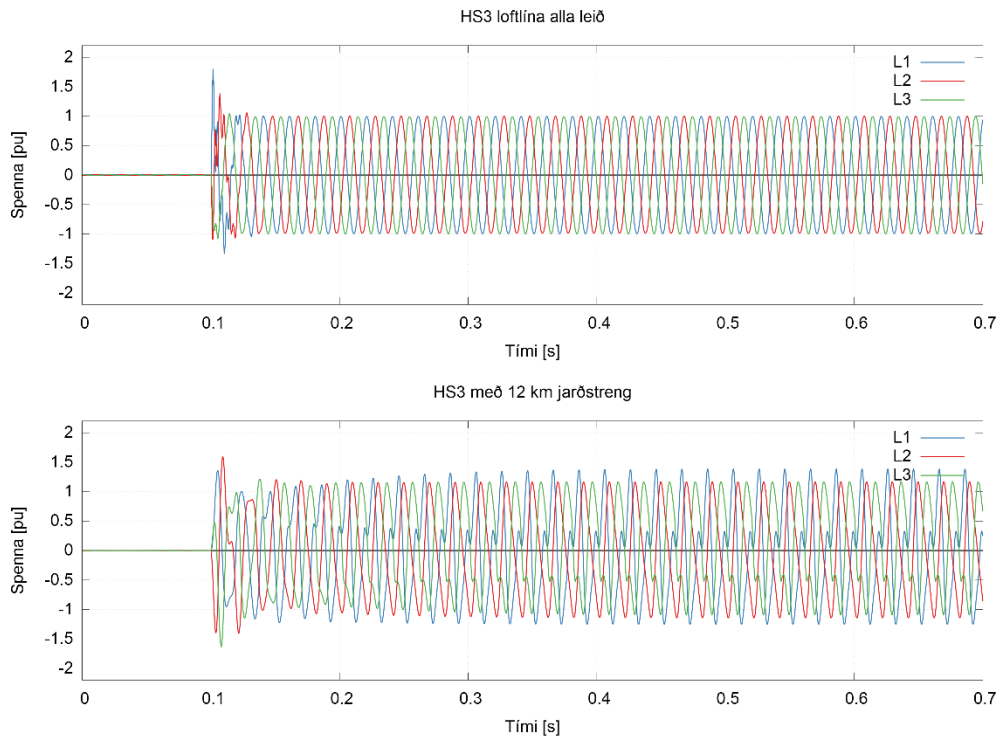
Mynd 5-10 - Spennur við opinn enda við spennusetningu HS3 frá Kröflu þysjað út

Skoðuð var spennusetning frá Rangárvöllum. Mynd 5-11 sýnir innhleypistraum við spennusetningu HS3 við spennusetningu frá Rangárvöllum. Innhleypistraumur þegar HS3 er byggð sem loftlína alla leið er í kringum 200 A en þegar 12 km hluti hennar er lagður sem jarðstrengur verður hann u.þ.b 750 A. Innhleypistraumur dempast á 50 ms þegar HS3 er byggð sem loftlína alla leið á meðan innhleypistraumur er ekki búinn að ná jafnvægi eftir 600 ms þegar 12 km hluti er lagður í jörðu. Straumur er mjög bjagaður í upphafi.

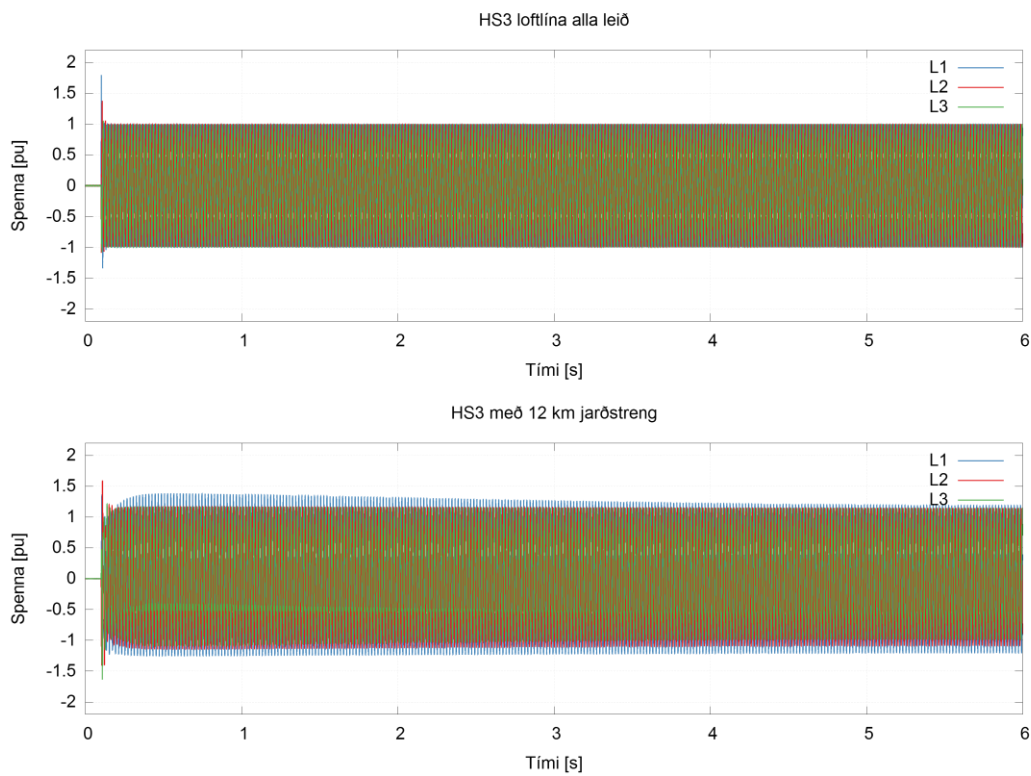


Mynd 5-11 - Innhleypistraumur við spennusetningu HS3 frá Rangárvöllum

Mynd 5-12 sýnir spennu á opnum enda HS3 við spennusetningu frá Rangárvöllum. Útslag spennu fyrir HS3 byggð sem loftlína alla leið er 1,8 pu og lögð sem jarðstrengur er 1,64 pu. Svípul spenna sem myndast við spennusetningu HS3 byggð sem loftlína er fulldempuð eftir u.þ.b. 50 ms. Þegar HS3 er að hluta lögð sem strengur myndast tímabundin yfirspenna en hún er undir viðmiðunarmörkum og takmarkar því ekki strenglengd.



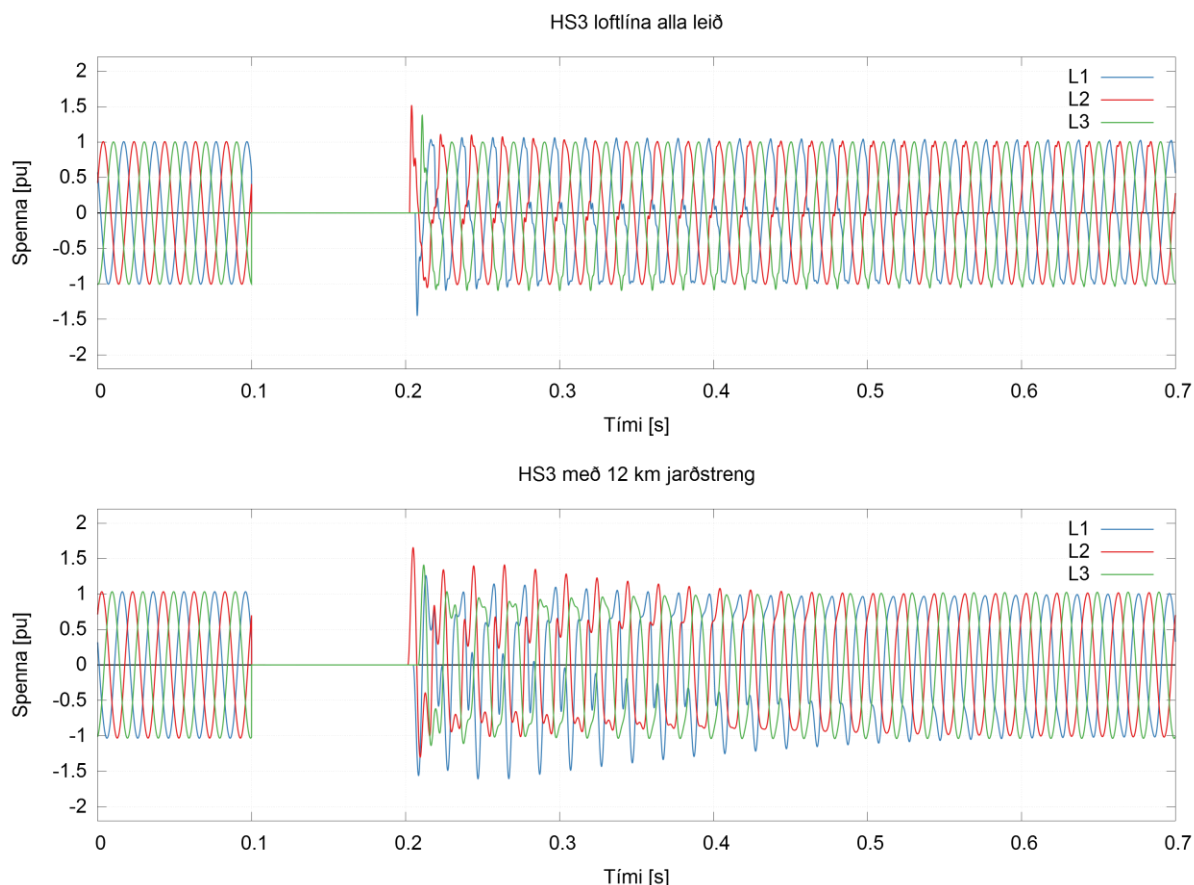
Mynd 5-12 - Spennur við opinn enda við spennusetningu HS3 frá Rangárvöllum



Mynd 5-13 - Spennur við opinn enda við spennusetningu HS3 frá Rangárvöllum þysjað út

5.3.2 Truflun við Rangárvelli

Reiknuð var tímabundin yfirspenna sem verður við 100 ms truflun á 220 kV teini á Rangárvöllum (Mynd 5-14). Þriggja fasa truflun er sett á tein Rangárvalla í 100 ms og síðan aftengd. Útslag yfirspennu er 1,52 pu þegar HS3 er byggð sem loftlína alla leið. Þegar hluti HS3 er lagður í jörðu er útslag yfirspennu u.þ.b 1,7 pu og í kjölfarið myndast yfirspenna með útslag 1,61 pu. Við truflun við Rangárvelli myndast tímabundin yfirspenna yfir viðmiðunarmörkum fyrir loftlínu þar sem hluti er lagður í jörðu.



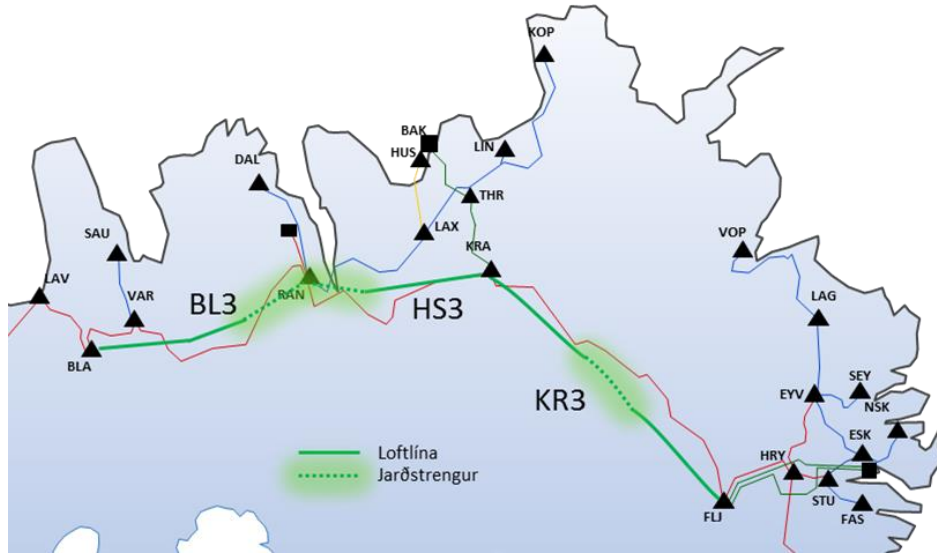
Mynd 5-14 - Tímabundnar yfirspennur sem myndast við truflun á 220 kV teini í Rangárvöllum

5.3.3 Niðurstöður svipullar greiningar

Við spennusetningu HS3 byggð sem loftlína alla leið var innhleyppistraumur lágur og útslag spennu miðað við þegar hluti hennar er lagður sem jarðstrengur. Við spennusetningu HS3 þegar 12 km hluti hennar er lagður sem jarðstrengur mynduðust tímabundnar yfirspennur sem voru illa dempaðar. Tímabundnar yfirspennur eru yfir mörkum í tilfalli truflunar við Rangárvelli og spennusetningar og takmarka því strenglengd.

6 Hólasandslína 3 (HS3), Kröflulína 3 (KR3) og Blöndulína 3 (BL3)

Í þessum kafla er flutningskerfið skoðað miðað við framtíðaruppbyggingu á Norður- og Austurlandi, þ.e. með allar þrjár 220 kV flutningslínurnar inni í einu, þ.e. KR3, HS3 og BL3. Skoðuð eru áhrif slíkrar styrkingar á rekstrarspennu og launafisflæði. Mynd 6-1 sýnir yfirlitsmynd af kerfinu:

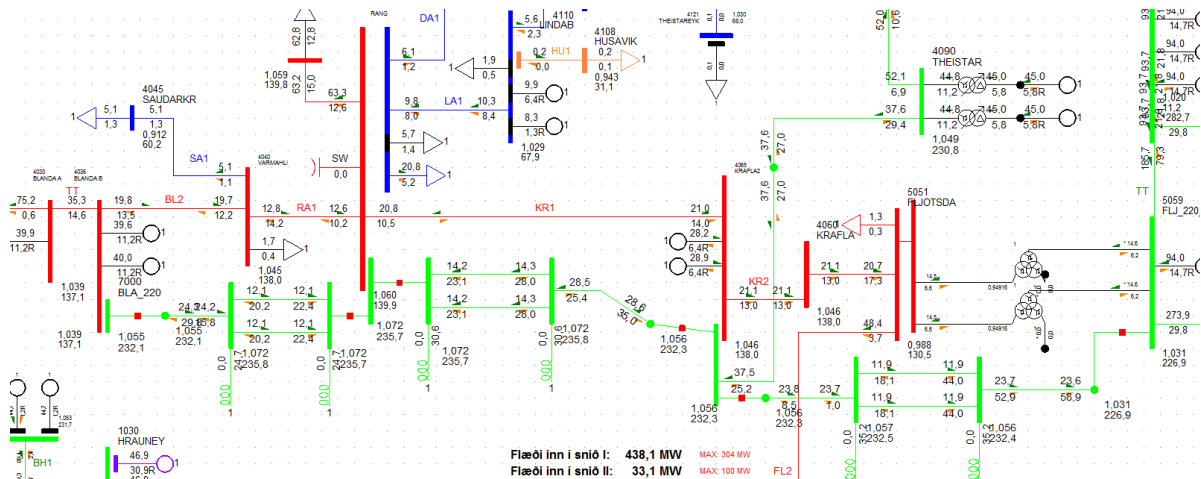


Mynd 6-1 - Nýjar 220 kV flutningslínur/strengir á Norður- og Austurlandi

Stuðst er við þær hámarkslengdir og úttjöfnun jarðstrengshluta sem fundnar eru í köflum 3 – 5, þ.e.:

- BL3: 10 km langur jarðstrengur næst Rangárvöllum, með um 60 Mvar úttjöfnun.
- HS3: 12 km langur jarðstrengur næst Rangárvöllum, með um 50 Mvar úttjöfnun.
- KR3: 15 km langur jarðstrengur í miðri línu, með um 50 Mvar úttjöfnun.

Mynd 6-2 sýnir stöðuna á kerfinu í venjulegum rekstri með allar þrjár flutningslínurnar inni, með ofangreindum jarðstrengslengdum:



Mynd 6-2 - Yfirlitsmynd af kerfinu í PSS/E. Jarðstrengir í öllum þremur línum eins og lýst er að ofan

Spennan er há í fyrirhuguðu 220 kV kerfi á Norðausturlandi, þá sérstaklega í kringum Rangárvelli, þar sem spennan fer hæst í 1,072pu (235,7 kV) í óskertu kerfi. Tvær ástæður eru fyrir því hver vegna spennan er svo há á Rangárvöllum, annars vegar sú að strengir í BL3 og HS3 enda báðir á Rangárvöllum og því fer meira launafli þangað og hins

vegar vegna þess að skammhlaupsafl á Rangárvöllum er mjög lágt. Engin vinnsla er á svæðinu og því er kerfið veikt, sem veldur því að spennan hækkar töluvert. Vélar í Blöndustöð undirsegulmagna um 11 Mvar per vél (hámark fyrir vélar er 12 Mvar) og því óraunhæft að reka kerfið við þessar aðstæður að staðaldri þar sem almennt ættu vélar að vera að segulmagna í venjulegum rekstri (framleiða launafl). Vélar í Fljótsdalsstöð eru að undirsegulmagna um 15 Mvar á vél og eins og í Blöndustöð ættu vélar að vera að segulmagna (framleiða launafl). Eins og í fyrri greiningum er skoðað hver rekstrarspennan á 220 kV teinum er í opnum strengenda, þ.e. eftir spennusetningu á línu/streng. Niðurstöður kerfisgreininga í PSS/E sýna eftirfarandi (versta tilvik):

- Þegar rofi á Blöndulínu 3 (BL3) er opnaður á Rangárvöllum fer spennan í strengendanum langt yfir efri mörk (1,192 pu/262 kV).
- Þegar rofi á Hólasandslínu 3 (HS3) er opnaður á Rangárvöllum fer spennan í strengendanum yfir mörk (1,103 pu/242,6 kV).
- Þegar rofi á Hólasandslínu 3 (HS3) er opnaður við Kröflustöð fer spennan á öllum teinum frá Blöndustöð að opnum strengenda í Kröflustöð yfir mörkum (1,111-1,138 pu), bæði í 220 kV kerfi og núverandi 132 kV byggðalínu.
- Þegar rofi á Kröflulínu 3 (KR3) er opnaður í Fljótsdalsstöð fer spennan í kerfinu langt yfir mörk, hæst við loftlínuenda næst Fljótsdal, 1,226 pu (270 kV). Spennan á 132 kV byggðalínunni fer einnig yfir 1,1 pu frá Laxárvatni að Kröflustöð.

Út frá þessum niðurstöðum er áhugavert að skoða hvernig skammhlaupsafl á 220 kV teinum breytist þegar rofarnir eru opnaðir. Tafla 6-1 sýnir skammhlaupsafl á nýju 220 kV teinum á Norður- og Austurlandi í heilu kerfi og þegar rofar eru opnaðir:

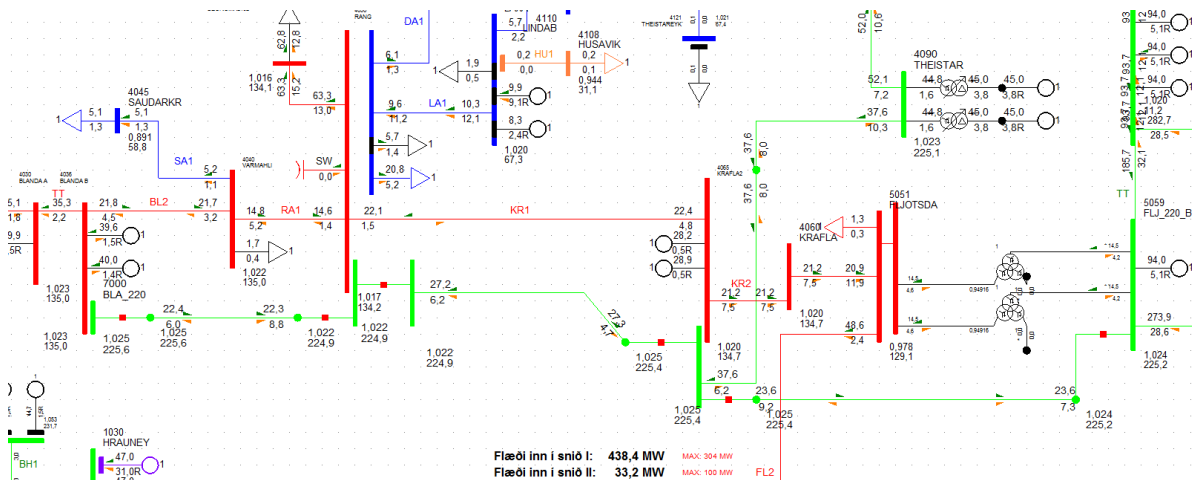
Tafla 6-1 – Skammhlaupsafl í 220 kV kerfinu, mismunandi tilvik

Flutningslína	Samtengt kerfi	Rofi í KR3 opinn í FLJ	Rofi í HS3 opinn í KRA	Rofi í BL3 opinn í RAN
BL3 – Við BLA	1.384 MVA	1.002 MVA	861 MVA	457
BL3 – Við RAN	1.396 MVA	1.007 MVA	863 MVA	454
HS3 – Við RAN	1.396 MVA	1.007 MVA	863 MVA	1.136
HS3 – Við KRA	1.395 MVA	1.002 MVA	852 MVA	1.139
KR3 – Við KRA	1.949 MVA	683 MVA	1.793 MVA	1.856
KR3 – Við FLJ	1.974 MVA	674 MVA	1.820 MVA	1.882

Niðurstöður sýna að skammhlaupsafl er mjög háð því að nýtt 220 kV kerfi sé samhangandi milli Blöndu og Fljótsdals. Skammhlaupsafl í núverandi 132 kV kerfi (án 220 kV flutningslína) er 1.065 MVA í Blöndu, 591 MVA á Rangárvöllum og 725 MVA í Kröflu. Eins og fram hefur komið er teinaspennan frekar há í venjulegum rekstri, en lítið álag er á kerfinu og því eðlilegt að spennan sé í hærri kantinum. Þegar rofar á nýju línunum eru opnaðir, einn í einu, breytist kerfið töluvert þar sem skammhlaupsafl lækkar mikið línunum við rofann. Ef rofi á HS3 við Kröflustöð er opnaður fellur skammhlaupsafl mikið á teinum frá Kröflustöð að Blöndustöð sem veldur töluverðri spennuhækkun í þeim hluta kerfisins, bæði á 132 kV- og 220 kV teinum.

Launaflsútfjöfnun fyrir flutningslínurnar þrjár; KR3, HS3 og BL3, er ekki næg þegar allar þrjár línurnar eru tengdar kerfinu og spennusetja á kerfið með þeim hámarksstrenglengdum sem fundnar hafa verið. Spennuprepin verða of há. Ekki er hægt að stækka útfjöfnunarspólur þar sem útfjöfnun er nú þegar 50% fyrir allar þrjár línurnar.

Áhugavert er að skoða aflflæðið og spennur í kerfinu ef BL3, HS3 og KR3 eru loftlínur að öllu leyti. Mynd 6-3 sýnir yfirlitsmynd af kerfinu við þessar aðstæður. Sjá Mynd 6-2 til samanburðar.



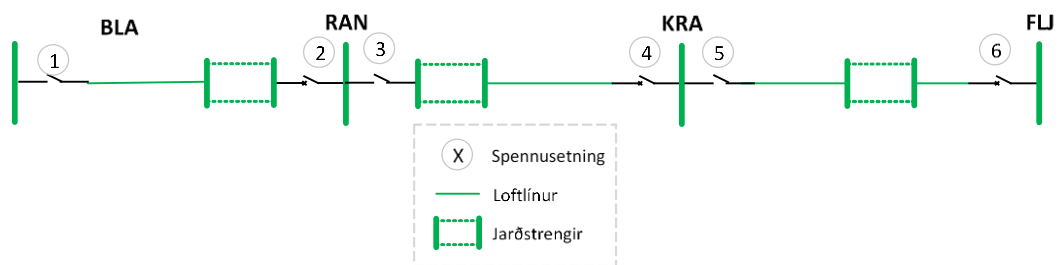
Mynd 6-3 - Staðan á kerfinu þegar nýjar 220 kV flutningslínur eru loftlínur

Niðurstöður sýna að rekstrarspennan í 220 kV kerfinu er vel innan efri/neðri marka, eða í kringum 1,025 pu í venjulegum rekstri. Rekstrarspenna breytist lítið þegar rofar á 220 kV línur eru opnaðir, sem er öfugt við það sem gerist þegar hluti línanna er lagður í jörð.

6.1 Stöðugleiki og spennuþrep – Greining á kvikri hegðun – PSS®E

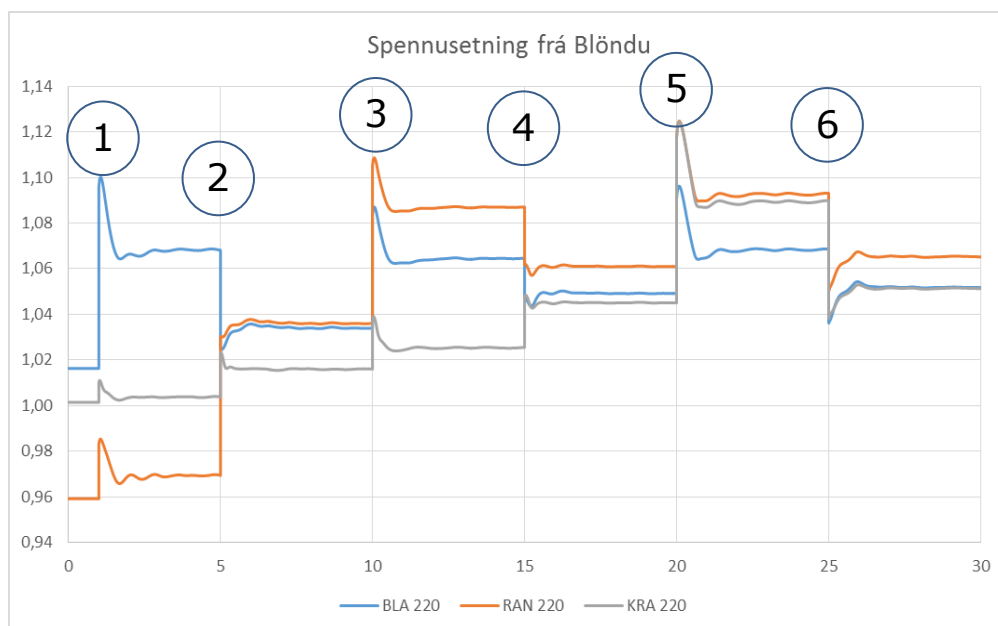
6.1.1 Spennusetning á flutningslínunum, með jarðstreng að hluta til

Eins og fram hefur komið er nauðsynlegt að skoða hvort mögulegt sé að spennusetja línurnar og þá hvernig. Mynd 6-4 sýnir yfirlitsmynd af 220 kV kerfinu milli Blöndu og Fljótsdals, með jarðstrengjum að hluta:



Mynd 6-4 - Spennusetning á 220 kV línunum. Innsetning frá BLA að FLJ

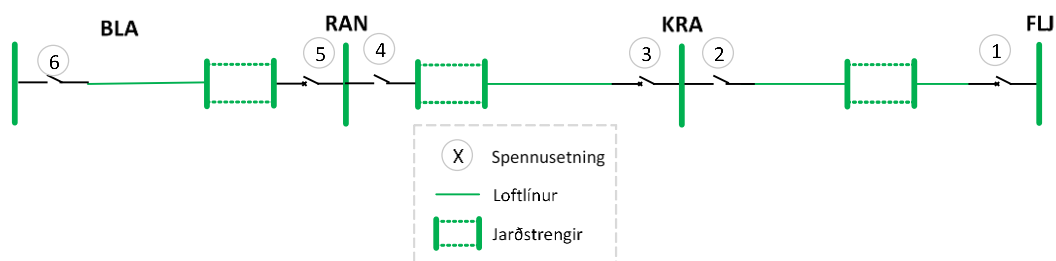
Spennusetta er í þeirri röð sem sýnt er á myndinni, þ.e. byrjað á að loka rofa í BL3 Blöndumegin og nokkrum sekúndum síðar er rofanum Rangárvallamegin lokað. Svo er haldið áfram koll af kalli uns allar línurnar þrjár eru komnar inn. Mynd 6-5 sýnir spennuna á 220 kV teinum í Blöndu, á Rangárvöllum og í Kröflu þegar flutningslínurnar eru spennusettar í þessari röð.



Mynd 6-5 - BL3, HS3 og KR3 spennusettar frá Blöndu

Fyrsta spennuþrepið í Blöndu er á mörkum (5%), en lagast þegar allt er komið inn og endar í u.þ.b. 3,5%. Spennuþrepið á Rangárvöllum, þegar rofanum fyrir BL3 er lokað þar við $t=5$ s er yfir mörkum. Ef horft er á allan spennusetningarferilinn í heild sést að lokagildi spennunnar á Rangárvöllum er rúmlega 10% hærra en upphafsgildið. Rangárvöllir eru því sérlega viðkvæmur punktur.

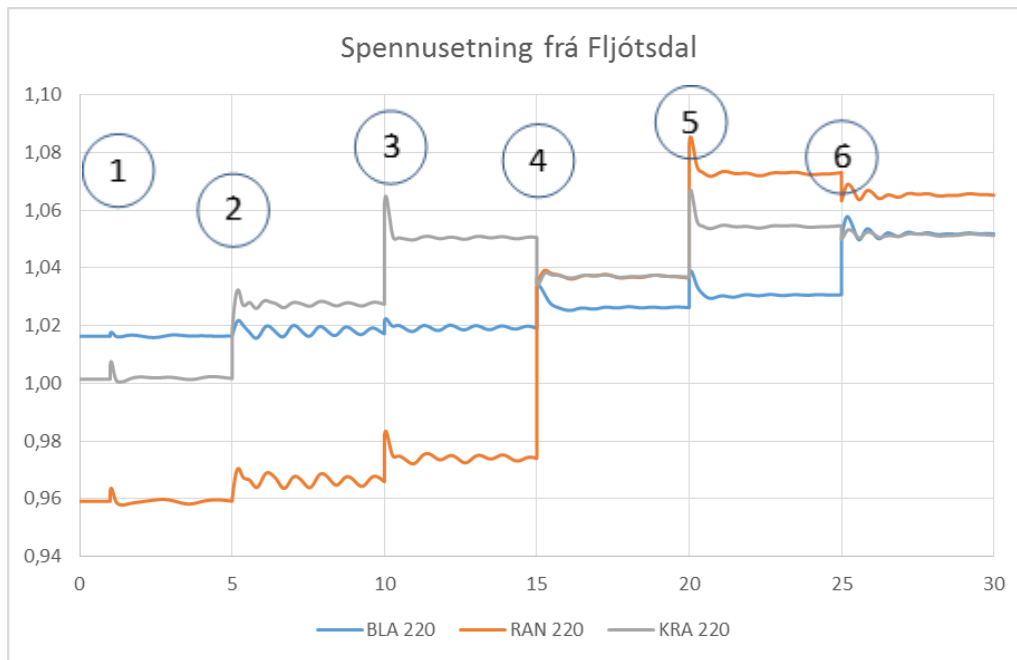
Einnig var skoðað hvort hægt væri að spennusetja línurnar úr hinni áttinni, þ.e. frá Fljótsdal að Blöndu:



Mynd 6-6 - Spennusetning á 220 kV línunum. Innsetning frá FLJ að BLA

Byrjað er að spennusetja KR3 frá FLJ og loka svo rofanum í KRA nokkrum sekúndum síðar. Svo er haldið áfram, koll af kolla, og endað í Blöndu.

Mynd 6-7 sýnir spennuna á 220 kV teinum í Blöndu, á Rangárvöllum og í Kröflu þegar flutningslínurnar eru spennusettar í þessari röð.



Mynd 6-7 - KR3, HS3 og BL3 spennusettar frá Fljótsdal

Spennan á Rangárvöllum er sem fyrr viðkvæmust. Stærsta spennubrepið verður þegar rofanum fyrir HS3 er lokað Rangárvallamegin (rúmlega 6%). Spennan á Rangárvöllum eftir að spennusetningarferlinu er lokið er rúmlega 10% hærri en fyrir spennusetningu.

Niðurstöður sýna að það er talsverð áskorun að spennusetja flutningslínurnar með þessum hætti svo að spennugæðakröfur, með tilliti til spennubreps, séu uppfylltar.

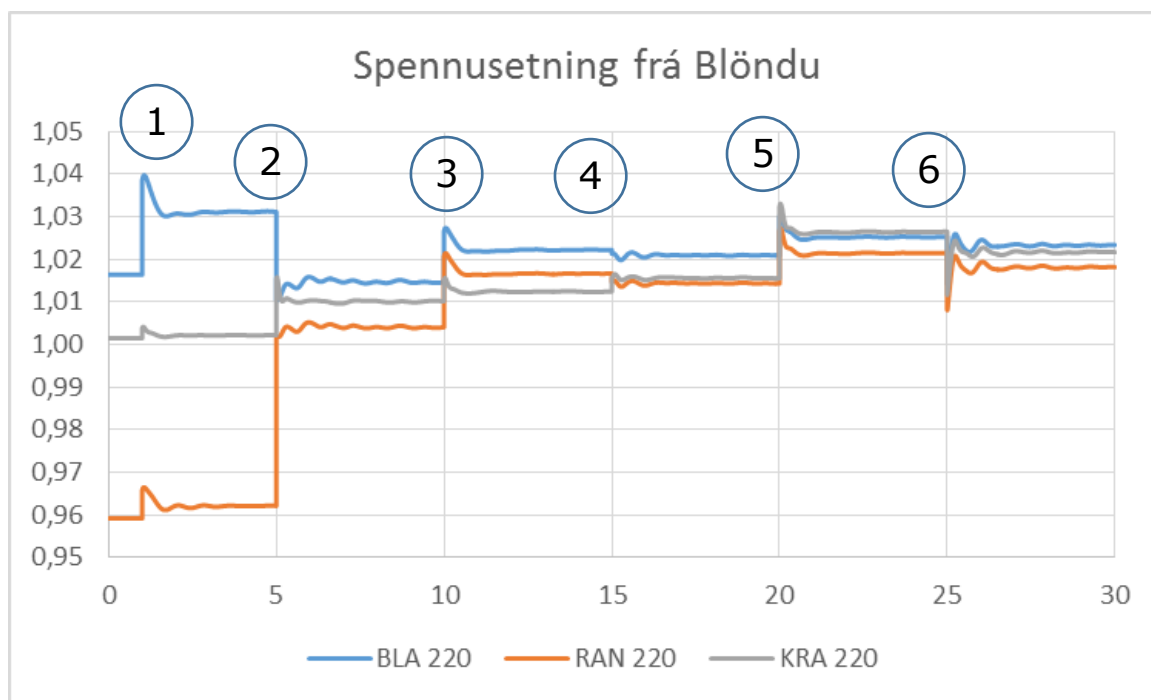
6.1.2 Spennusetning á flutningslínunum – Loftlínur alla leið

Gerð er sama greining og í kafla 6.1.1 nema núna er miðað við að nýju línurnar þrjár, KR3, HS3 og BL3, séu loftlínur alla leið. Er þetta gert til þess að hafa samanburð á þessari styrkingu með og án jarðstrengja. Mynd 6-8 sýnir yfirlit af kerfinu og í hvaða röð rofarnir eru settir inn.



Mynd 6-8 - Spennusetning á 220 kV línunum. Innsetning frá BLA að FLJ

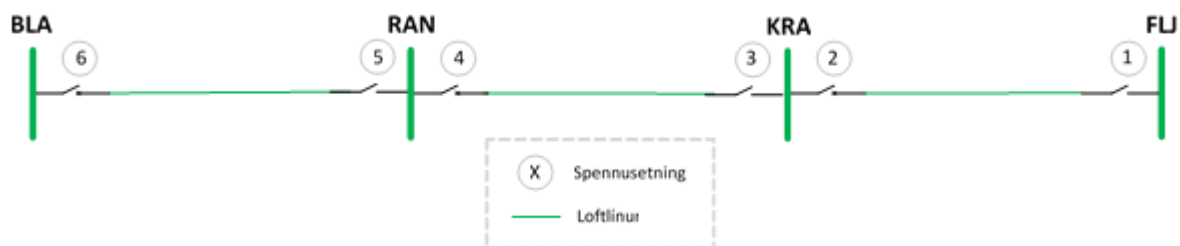
Mynd 6-9 sýnir spennuna á nokkrum teinum í nýja 220 kV kerfinu þegar línurnar eru settar í rekstur:



Mynd 6-9 - KR3, HS3 og BL3 spennusettar frá Blöndu. Loftlínur alla leið

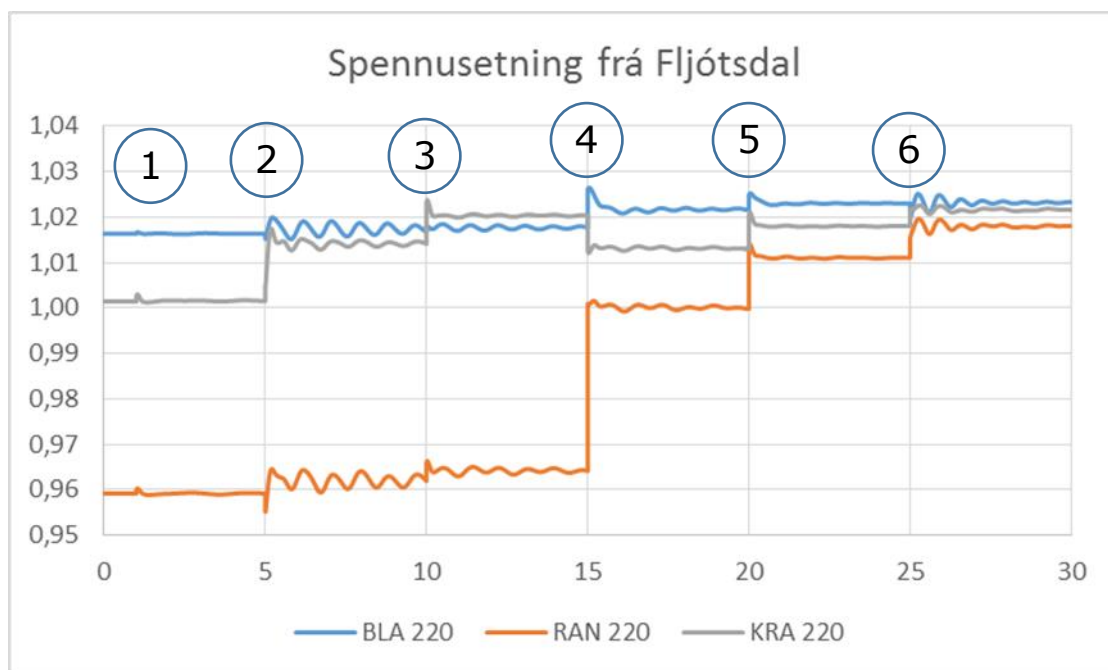
Enn er það spennan á Rangárvöllum sem er viðkvæmest. Spennuþrepið er þó innan marka.

Spennusetning frá Fljótsdal að Blöndu var einnig hermd. Mynd 6-10 sýnir yfirlit af kerfinu og í hvaða röð rofarnir eru settir inn:



Mynd 6-10 - Spennusetning á 220 kV línunum. Innsetning frá FLJ að BLA. Loftlínur alla leið

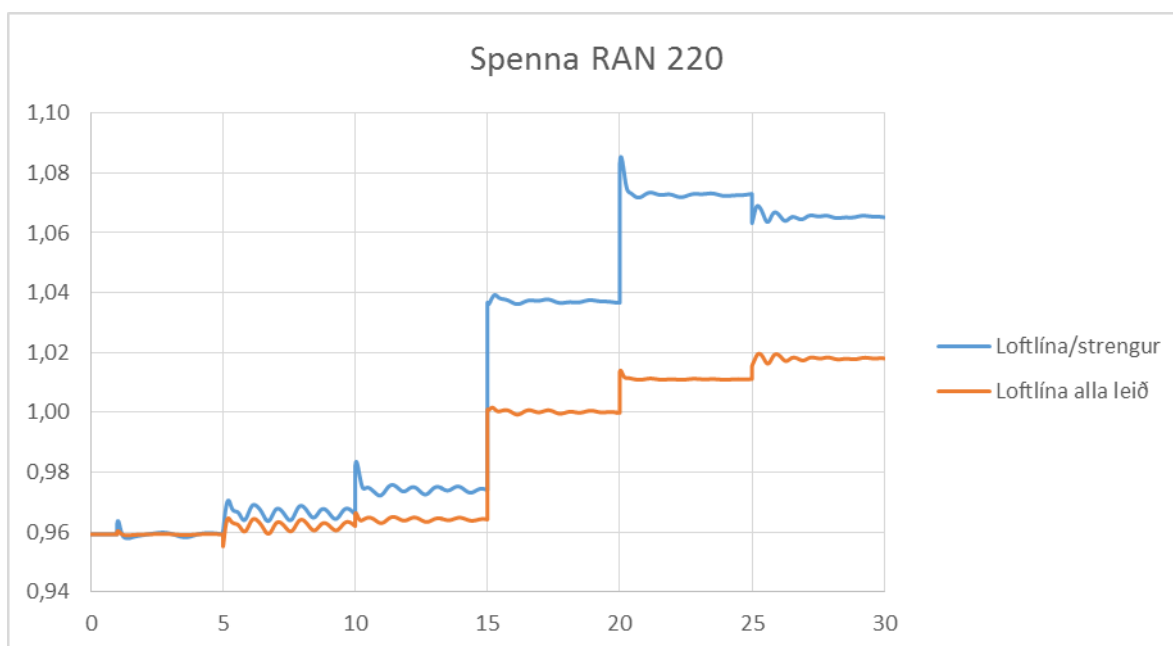
Mynd 6-11 sýnir spennuna á nokkrum teinum í nýja 220 kV kerfinu þegar línurnar eru settar í rekstur:



Mynd 6-11 - KR3, HS3 og BL3 spennusettar frá Fljótsdal. Loftlínur alla leið

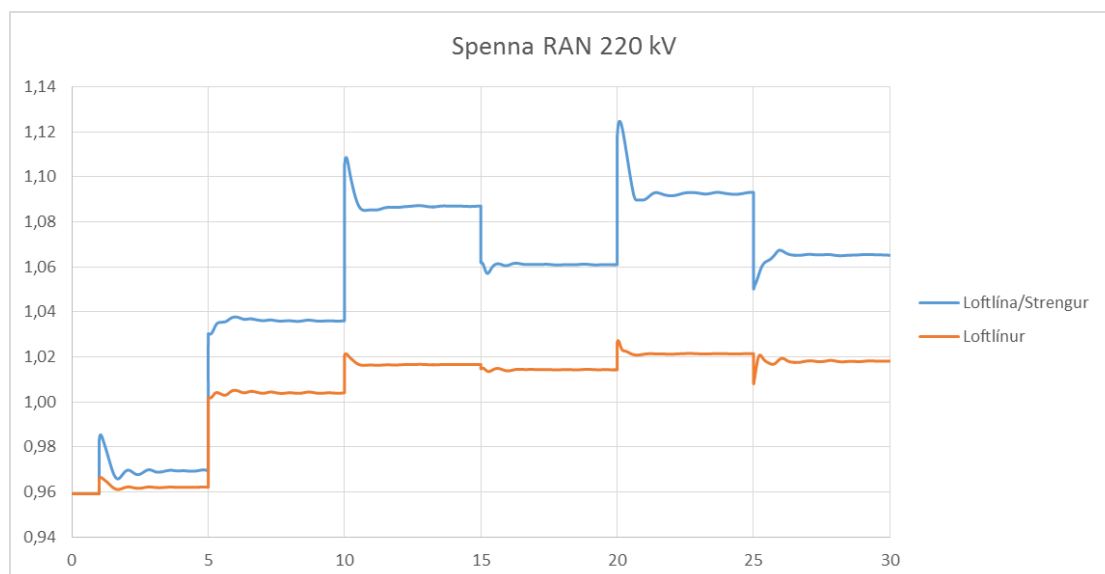
Spennuþrepið á Rangárvöllum er lægra þegar spennuset er frá Fljótsdal en þegar það er gert frá Blöndu, enda er þá spennuset frá sterkari punkti.

Mynd 6-12 sýnir spennuna á Rangárvöllum við spennusetningu frá Fljótsdal að Blöndu; fyrir loftlínu annars vegar og blandaða leið (loftlínu/jarðstreng) hins vegar.



Mynd 6-12 - KR3, HS3 og BL3 spennusettar frá Fljótsdal. Spenna á Rangárvöllum

Við spennusetningu í hina áttina, þ.e. frá Blöndu, lítur spennan á Rangárvöllum svona út:



Mynd 6-13 - KR3, HS3 og BL3 spennusettar frá Blöndu. Spenna á Rangárvöllum

6.2 Greining á svipulli svörun – PSCAD

Forritið E-Tran frá Electranix var notað til þess að varpa grunnkerfi PSS®E með HS3, KR3 og BL3 byggðum sem loftlínu yfir í PSCAD. Skammhlaupsstraumar voru reiknaðir í PSCAD og PSS®E fyrir 220 kV teina í Fljótsdal, Kröflu, Rangárvöllum og Blöndu og voru niðurstöður samanburðar sannfærandi.

Tafla 6-2 – Samanburður á skammhlaupsstraumum í PSS/E og PSCAD

Teinn	PSS®E	PSCAD
Blanda 220 kV	2,75 kA	2,75 kA
Rangárvellir 220 kV	3,56 kA	3,356 kA
Krafla 220 kV	4,4 kA	4,403 kA
Fljótsdalur 220 kV	8,54 kA	8,54 kA

6.2.1 Samanburður á tíðnirófi loftlínukerfis og jarðstrengskerfis

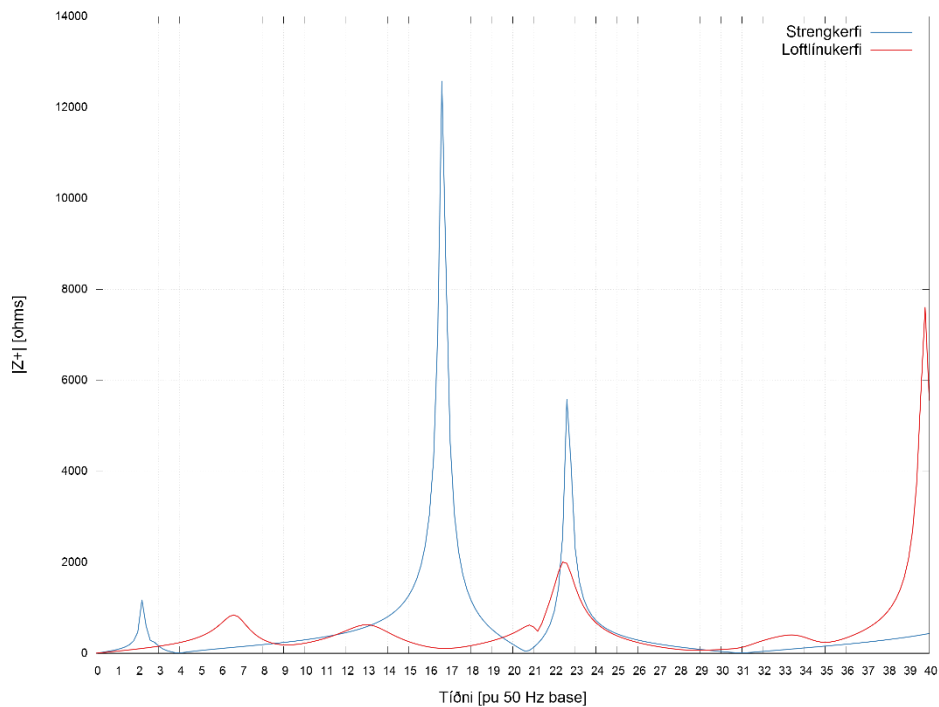
Vegna meiri rýmdar í jarðstrengjum en loftlínunum má gera ráð fyrir að tíðniróf á teinum þar sem hluti loftlína er lagður í jörðu sé ólíkt tíðnirófi loftlínukerfis, eins og áður hefur verið vikið að. Aukin rýmd færir samhliða meðsvæiflutíðnir kerfisins á lægri tíðnir og má því búast við tímabundnum yfirspennum við truflanir í kerfinu og spennusetningu raflína.

Skóðað var yfirtíðniróf fjögurra teina í 220 kV kerfinu á Norðurlandi:

- Blöndu
- Fljótsdal
- Kröflu
- Rangárvöllum

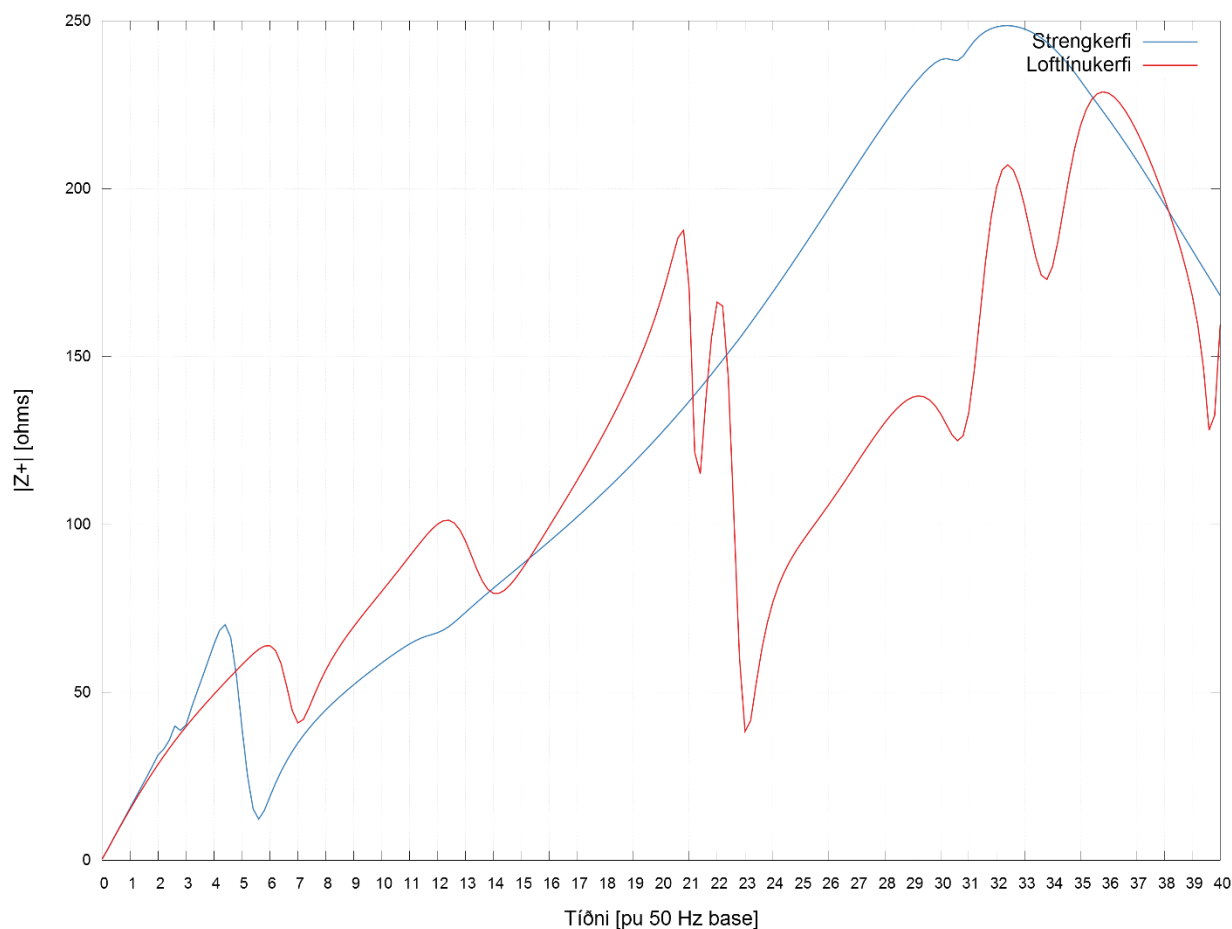
Mynd 6-14 sýnir yfirtíðniróf 220 kV kerfisins á Norðausturlandi séð frá Blöndu sem loftlínukerfis og þegar hluti þess er lagður í jörðu. Fyrir 220 kV tein í Blöndu má sjá samhliða meðsvæiflutíðni fyrir strengkerfi í kringum 2., 17. og 23. yfirtón. Jafnframt er útslag meðsvæiflutíðna strengkerfisins mun hærra en fyrir loftlínukerfið.

Meðsveiflutíðnin í kringum 100 Hz (2. yfirtón) getur leitt til staðbundinna yfirspenna þegar spennir eða strengur er spennu settur. Í strengkerfi er viðnám þessarar meðsveiflutíðni yfir 1000 Ω sem er hærra en viðmiðið.



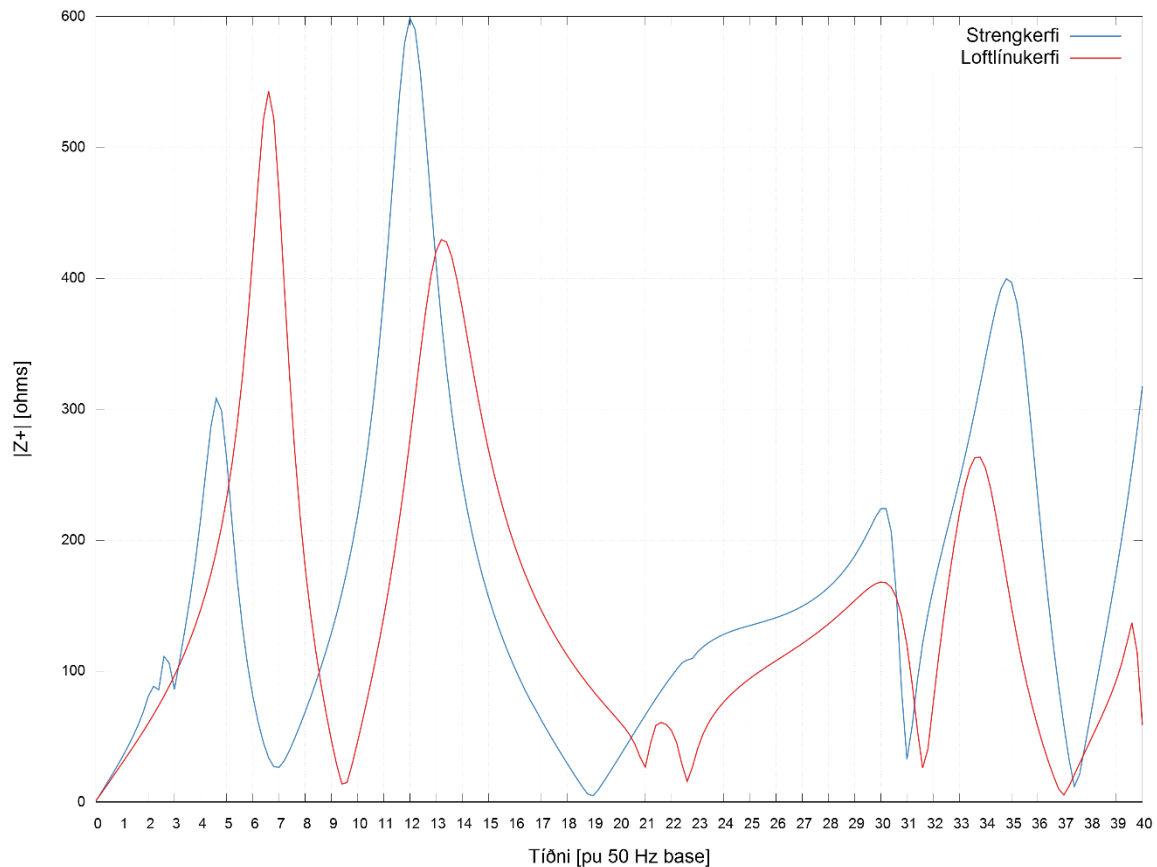
Mynd 6-14 - Samanburður á yfirtíðnirófum þegar hluti kerfisins er lagður sem jarðstrengur og allt kerfið byggt sem loftlínur séð frá 220 kV tein í Blöndu

Mynd 6-15 sýnir yfirtíðniróf 220 kV kerfisins á Norðausturlandi séð frá teini í Fljótsdal, byggt sem loftlína alla leið og þegar hluti þess er lagður í jörðu. Fyrir loftlínakerfi eru meðsveiflutíðnir í kringum 6., 12., 20. og 22. yfirtón. Fyrir kerfi með hluta lagðan sem jarðstrengi eru þó einungis yfirtíðnir í kringum 4. og 34. yfirtón. Útslag yfirtóna kerfisins séð frá teini í Fljótsdal er lægra en séð frá öðrum teinum í 220 kV kerfinu á Norðausturlandi.



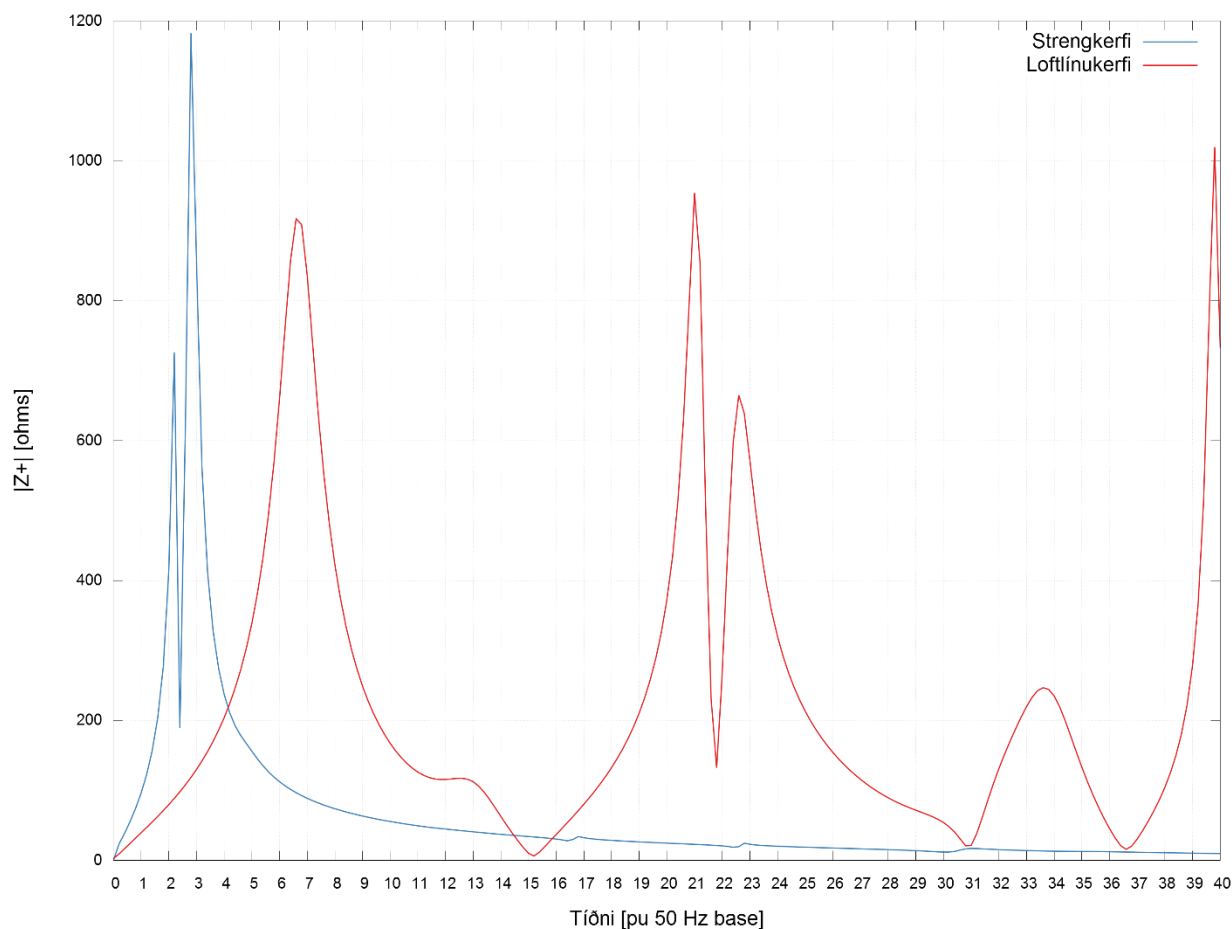
Mynd 6-15 - Samanburður á yfirtíðnirófum þegar hluti kerfisins er lagður sem jarðstrengur og allt kerfið byggt sem loftlínur séð frá 220 kV tein í Fljótsdal

Mynd 6-16 sýnir yfirtíðniróf 220 kV kerfisins á Norðausturlandi séð frá Kröflu þegar kerfið er byggt alfarið sem loftlínur og þegar hluti þess er lagður sem jarðstrengir. Fyrir kerfi með strengjum sést hvernig aukin rýmd færir með sveiflutíðni kerfisins á lægri tíðni. Fyrir strengkerfi eru með sveiflutíðni í kringum 5., 12. og 35. yfirtón með u.þ.b. 300, 600 og 400 ohm útslagi. Fyrir loftlínukerfi eru með sveiflutíðni í kringum 7., 14. og 35. yfirtón með u.þ.b. 550, 420 og 250 ohm útslagi.



Mynd 6-16 - Samanburður á yfirtíðnirófum þegar hluti kerfisins er lagður sem jarðstrengur og allt kerfið byggt sem loftlínur séð frá 220 kV tein í Kröflu

Mynd 6-17 sýnir tíðniróf 220 kV kerfisins á Norðausturlandi séð frá Rangárvöllum þegar kerfið er byggt alfarið sem loftlínur og þegar hluti þess er lagður sem jarðstrengir. Fyrir kerfi með hluta lagðan sem jarðstrengi eru meðsvæiflutíðnir í kringum 2. og 3. yfirtón með u.þ.b. 700 og 1200 ohm útslagi sem er yfir viðmiðunarmörkum. Fyrir loftlínakerfi má hinsvegar sjá yfirtóna í kringum 7., 21., 23., 34. og 39. yfirtón með u.þ.b. 900, 900, 650, 220 og 1000 ohm útslagi.



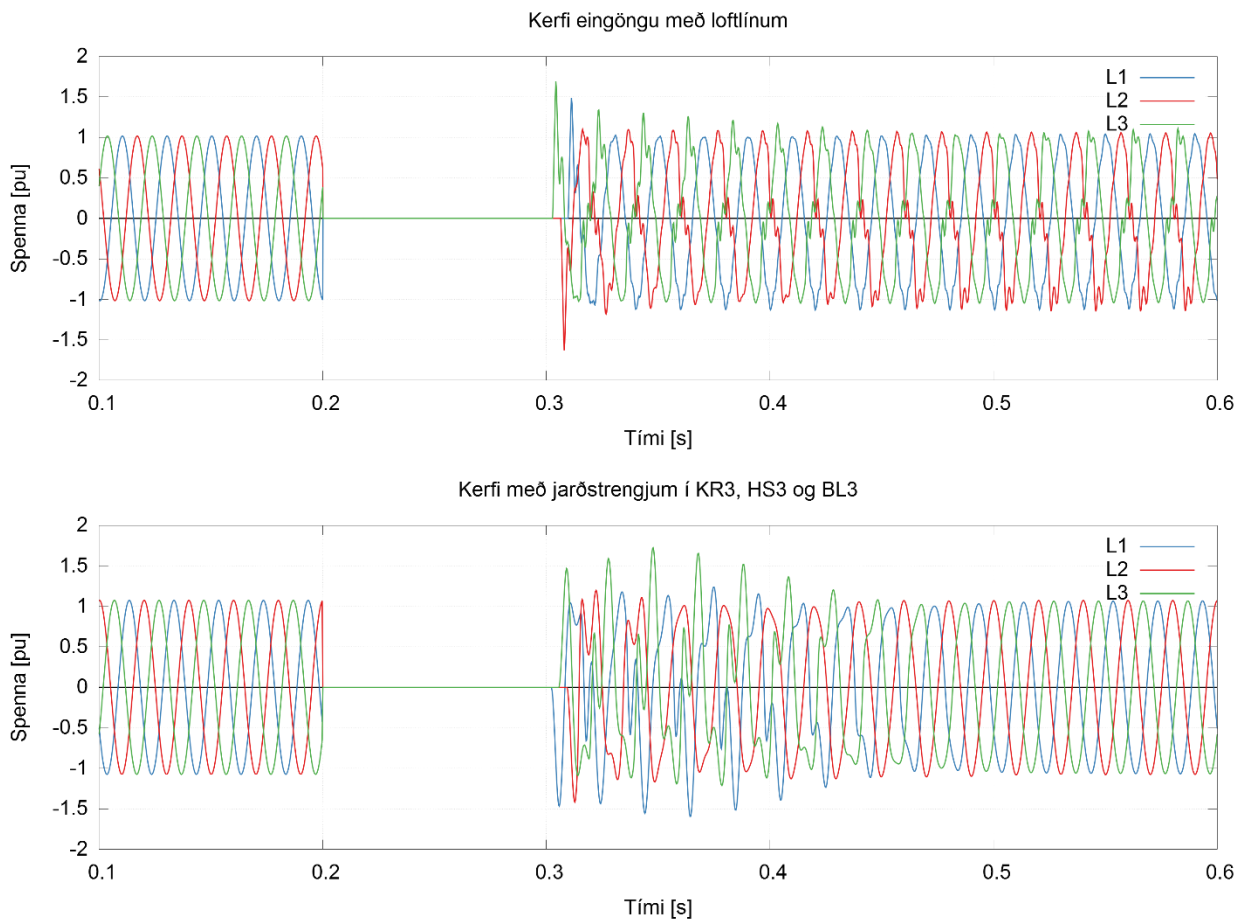
Mynd 6-17 - Samanburður á yfirtíðnirófum þegar hluti kerfisins er lagður sem jarðstrengur og allt kerfið byggt sem loftlínur séð frá 220 kV tein á Rangárvöllum

Ljóst er að talsverður munur er á samhliða með sveiflutíðnum og útslagi þeirra eftir því frá hvaða teini tíðnisvörðun kerfisins er mæld. Útslag með sveiflutíðna er lágt fyrir Fljótsdal þar sem skammhlaupsafl er hátt og strengir hafa jafnframt minni áhrif þar. Fyrir teina í Blöndu og á Rangárvöllum myndast samhliða með sveiflutíðni í kringum annan yfirtón sem er mjög varhugavert með tilliti til spennusetningar og truflana, meðal annars vegna samspils strengs og spennu. Venjulegar rekstraraðgerðir í kerfinu (t.d. rofahreyfingar) geta framkallað yfirtóna sem liggja nálægt 2. og 3. sem munu magnast upp og valda háum tímabundnum yfirspennum.

6.2.2 Svipul svörun kerfisins við truflun á 220 kV teini á Rangárvöllum

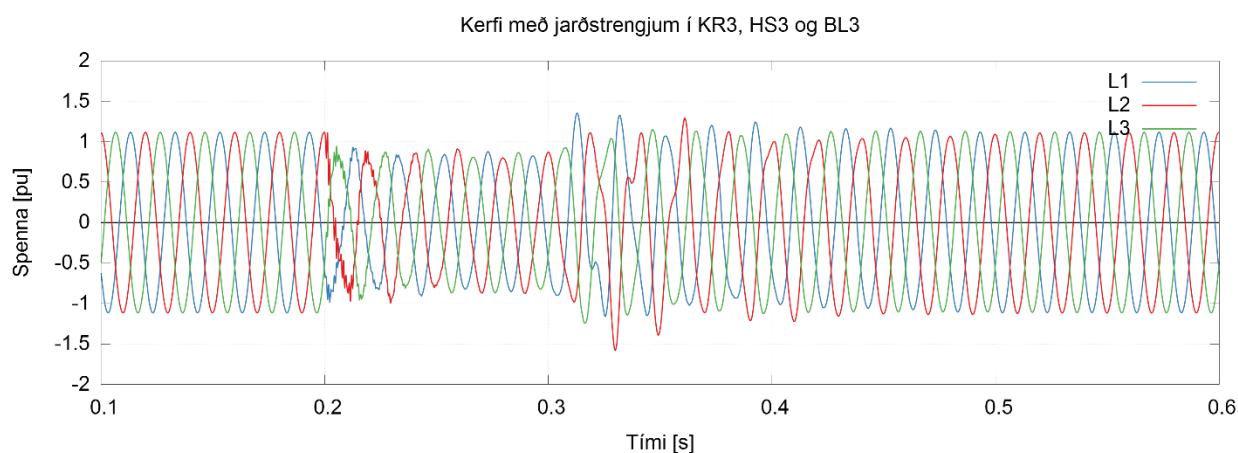
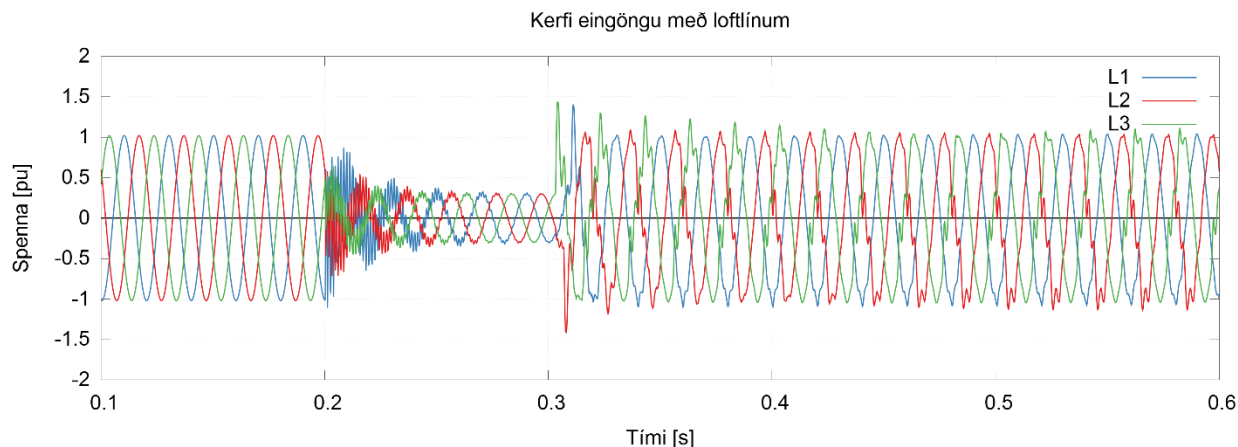
Til að bera saman svípula svörun loftlínukerfis og kerfis þar sem hluti er lagður í jörðu voru áhrif 100 ms truflunar á tein á Rangárvöllum skoðuð. Þriggja fasa truflun er sett á tein á Rangárvöllum og hún hreinsuð eftir 100 ms. Spenna á teinum á Rangárvöllum, í Blöndu og í Kröflu var mæld og er sýnd á myndum Mynd 6-18, Mynd 6-19 og Mynd 6-20.

Mynd 6-18 sýnir spennu á teini á Rangárvöllum við 100 ms truflun. Útslag spennu eftir truflun í loftlínukerfi er í u.þ.b. 1,68 pu en fyrir kerfi með jarðstrengjum 1,6 pu. Yfirspennur loftlínukerfis dempast hraðar (<1,1 pu eftir u.þ.b. 70 ms) en yfirspennur jarðstrengskerfis (150 ms). Yfirspenna kerfis með jarðstrengjum er um og yfir viðmiðunarmörkum.



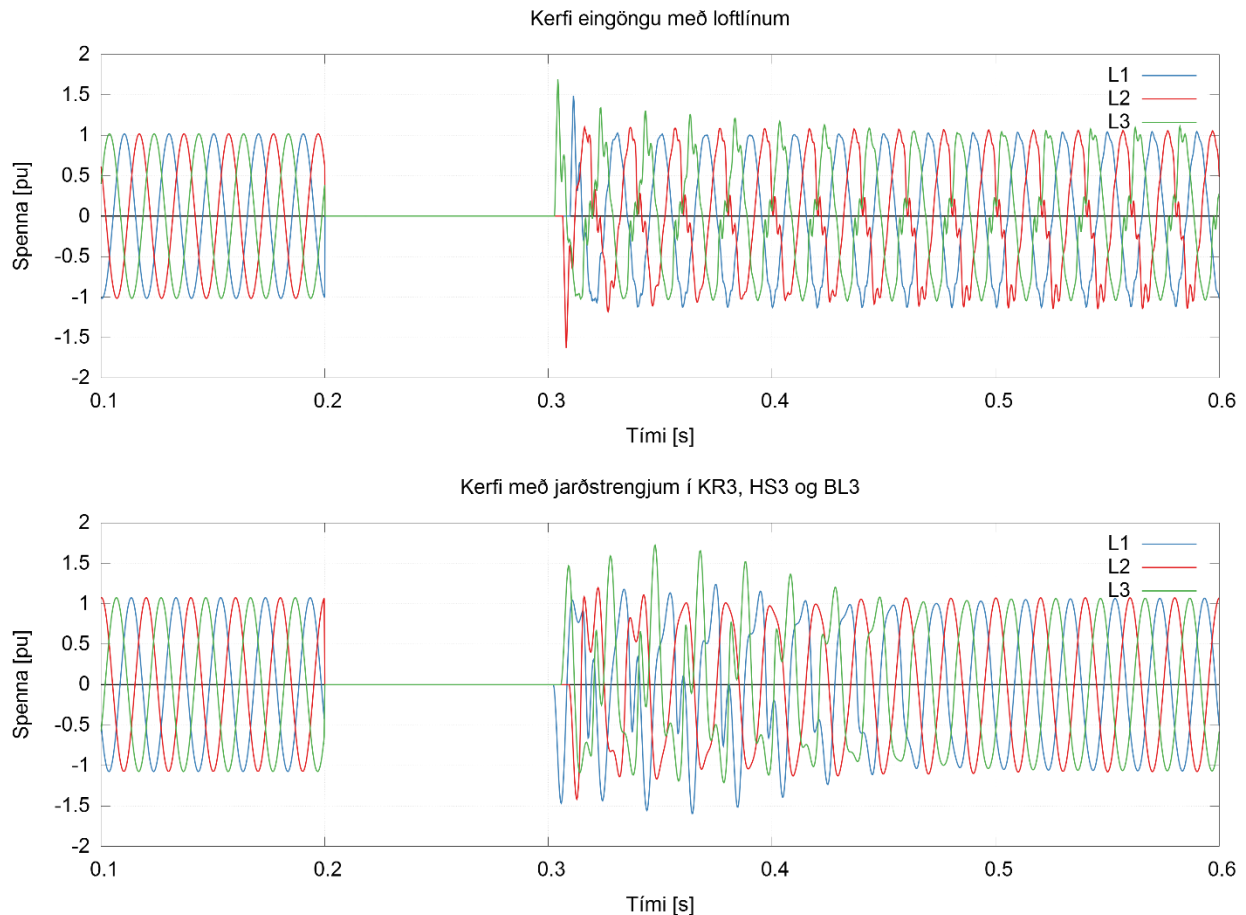
Mynd 6-18 - Spenna á 220 kV teini á Rangárvöllum þegar 100 ms truflun verður á teini Rangárvalla

Mynd 6-19 sýnir spennu á teini í Blöndu við sömu truflun. Spennan fellur meira í loftlínukerfinu en kerfi með jarðstrengjum. Tímabundnar yfirspennur við truflun á teini Rangárvalla fara yfir viðmunarmörk í tilfelli jarðstrengs og takmarka því strenglengd.



Mynd 6-19 - Spenna á 220 kV teini í Blöndu þegar 100 ms truflun verður á teini Rangárvalla

Mynd 6-20 sýnir spennu á teini í Kröflu. Spenna í loftlínukerfinu fellur meira við bilun á Rangárvöllum en í kerfi með jarðstrengjum. Útslag spennu eftir truflun er hærra fyrir loftlínukerfið (u.þ.b. 1,5 pu) en fyrir jarðstrengskerfið (u.þ.b. 1,3 p.u.). Teinn í Kröflu er stífari en teinar Rangárvalla og Blöndu þar sem hann er nær virkjunum sem tengjast 220 kV kerfinu beint (Kárahnjúkar og Þeistareykir).

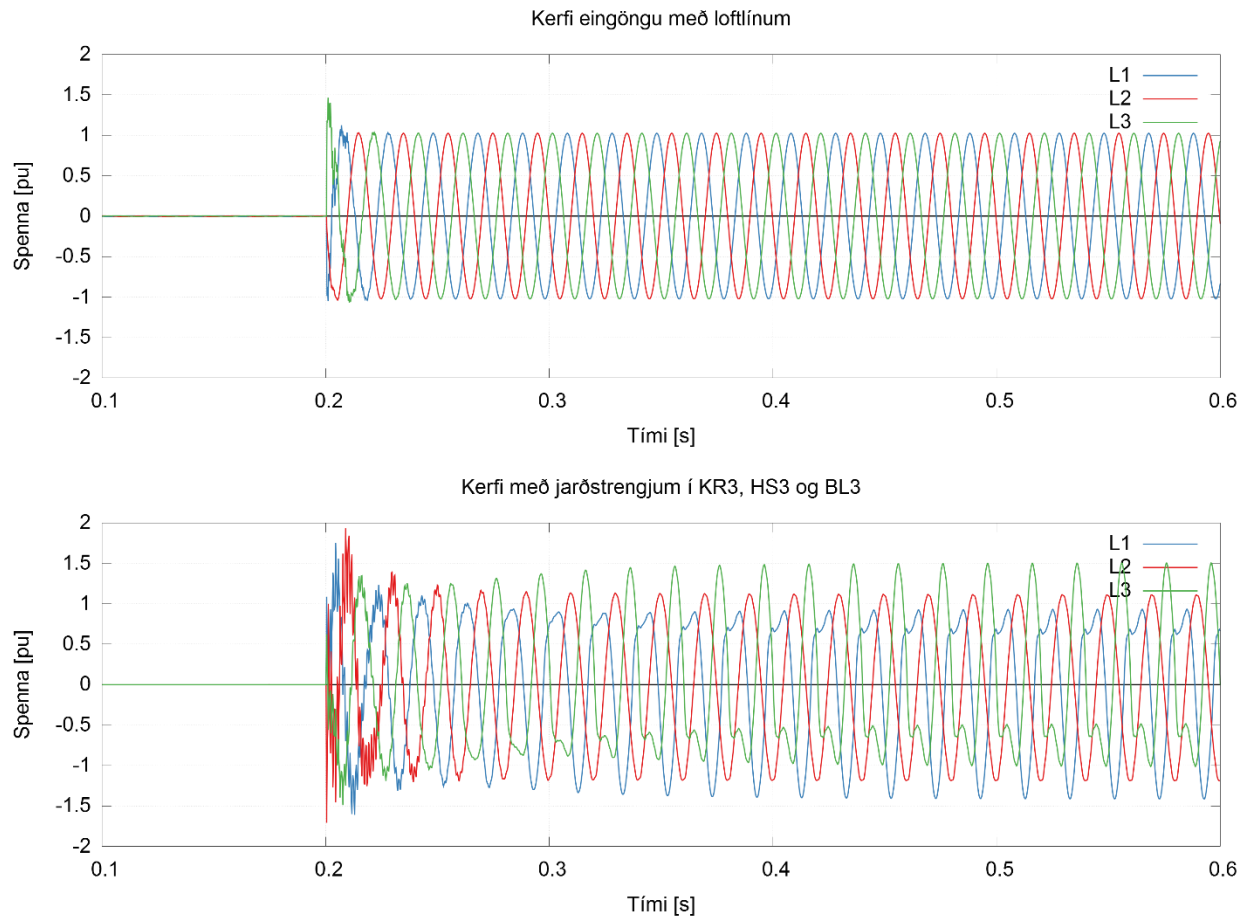


Mynd 6-20 - Spenna á 220 kV teini í Kröflu þegar 100 ms truflun verður á teini Rangárvalla

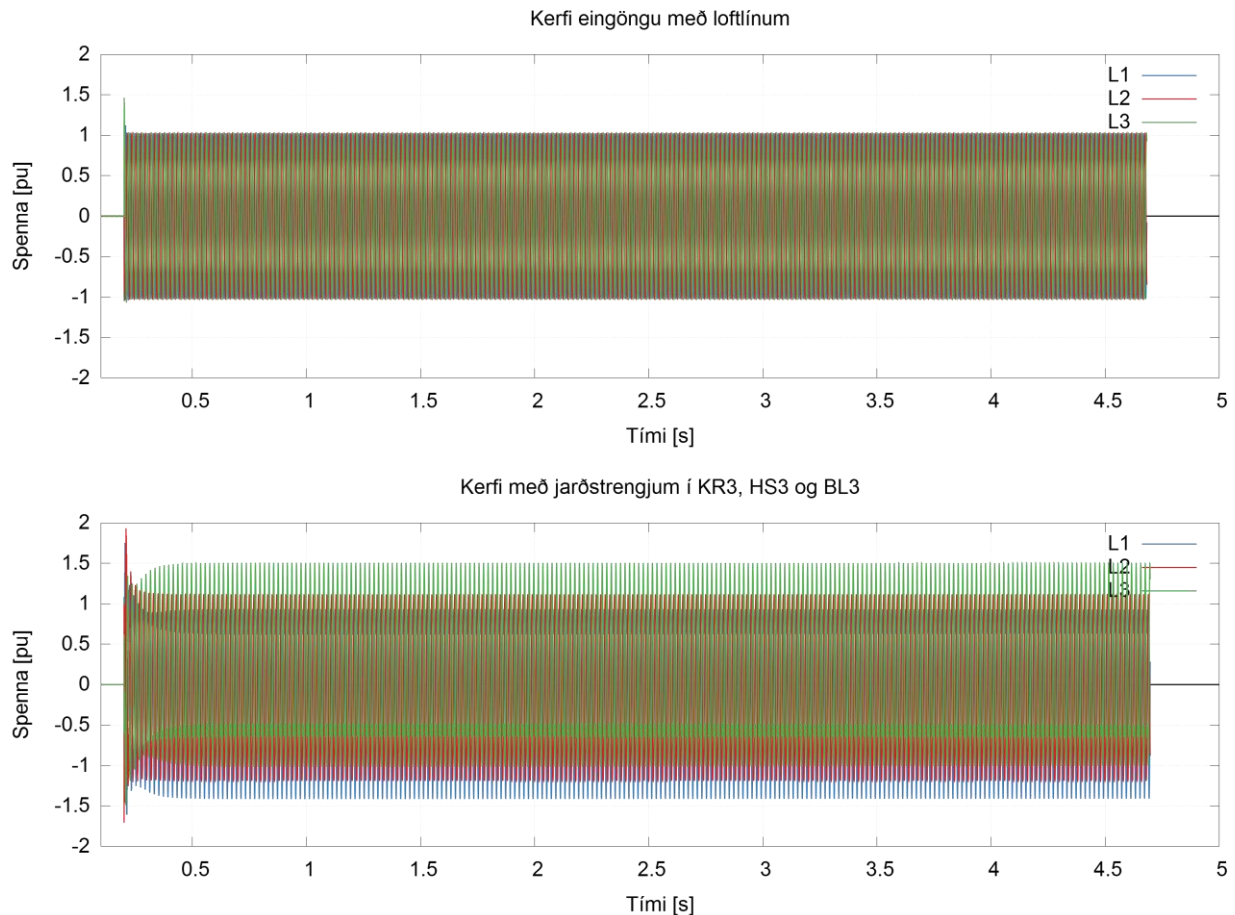
6.2.3 Spennusetning BL3

Blöndulína 3 er spennusettt frá Rangárvöllum til að bera saman spennusetningu loftlínu við jaðar 220 kV kerfisins á Norðausturlandi við kerfi þar sem raflínur eru á köflum byggðar sem jarðstrengir. Blöndulína 3 er tengd veikasta punkti 220 kV kerfisins á Norðausturlandi (Rangárvöllum) og því má gera ráð fyrir að sjá mesta breytingu í spennu þegar hún er spennusettt. Tekið er tillit til mettnar spennis á Rangárvöllum og hún byggð á stöðluðum gildum.

Mynd 6-21 sýnir spennu við opinn enda BL3 við spennusetningu frá Rangárvöllum. Fyrir kerfi sem er eingöngu loftlínur er spenna við opinn enda u.þ.b. 1,5 pu en fyrir kerfi með jarðstrengjum er spenna við opinn enda u.þ.b. 1,9 pu. Yfirspennur í kerfi byggt með loftlínunum eingöngu eru vel dempaðar (u.þ.b. 20 ms) en þegar kerfi er byggt með jarðstrengjum rís spennan við opinn enda eftir spennusetningu og er illa dempuð. Yfirspennan verður vegna samspils rýmdar strengja og spennis við Rangárvelli. Þessi yfirspenna hefur ekki verið dempuð eftir 5 s (Mynd 6-22). Spenna í þessu tilfalli er undir viðmiðunarmörkun en vegna þess hve illa yfirspennur eru dempaðar er óljóst hvort að búnaður muni þola slíka áraun og því getur spennusetning BL3 í þessu rekstartilfalli verið varasöm.



Mynd 6-21 - Spenna við opinn enda Blöndulínu 3 við spennusetningu hennar frá Rangárvöllum



Mynd 6-22 - Spenna við opinn enda Blöndulínu 3 við spennusetningu hennar frá Rangárvöllum

6.2.4 Niðurstöður svipullar greiningar

Skoðað var tíðniróf fjögurra teina 220 kV kerfisins á Norðausturlandi. Því lægra sem skammhlaupsaflið er á teinunum því meiri áhrif hafa jarðstrengir á yfirtíðniróf kerfisins. Tíðniróf á Rangárvöllum og í Blöndu sýndi meðsvæiflutíðnir í kringum annan yfirtón og fyrir Rangárvelli sást meðsvæiflutíðni jafnframt fyrir þriðja yfirtón. Viðnám á meðsvæiflutíðnum var í allmörgum tilfellum yfir viðmiðunarmörkum sem mun valda tímabundnum yfirspennum.

Við 100 ms truflun á Rangárvöllum var útslag spennu loftlínukerfis 1,68 pu en fyrir jarðstrengskerfi 1,6 pu. Yfirspenna í loftlínukerfi dempast hraðar (<1,1 pu eftir u.þ.b. 70 ms) en yfirspenna jarðstrengskerfisins (150 ms).

Við spennusetningu Blöndulínu 3 frá Rangárvöllum var útslag spennu lágt fyrir loftlínukerfi (< 1,5 pu) en fyrir jarðstrengskerfið var það hærra við spennusetningu (2 pu) og mynduðust yfirspennur sem voru illa dempaðar í kerfinu sem voru ekki orðnar dempaðar eftir 5 s.

Í nýju 220 kV flutningskerfi á Norðausturlandi hafa strengir slík áhrif að ekki er hægt að mæla með lagningu strengja í þeim mæli sem hefur verið skoðað hér.

Tímabundnar yfirspennur í strengkerfi voru í mörgum tilfellum yfir viðmiðunarmörkum sem takmarka strenglengd.

Samspil orku í strengjum og mettunar spenna leiðir til tímabundinna yfirspenna sem ógnar áreiðanleika kerfisins og getur leitt til þess að erfitt getur reynst að ná einangrunarsamhæfni í kerfinu.

7 Niðurstaða verkefnisins

Skoðaðar hafa verið mögulegar jarðstrengslengdir í þremur fyrirhugðum 220 kV línum á Norðurlandi:

- Blöndulínu 3 (BL3) á milli Blöndu og Rangárvalla,
- Hólasandslínu 3 (HS3) á milli Rangárvalla og Kröflu,
- Kröflulínu 3 (KR3) á milli Kröflu og Fljótsdals.

Miðað var við að flutningsgeta jarðstrengja þyrfti að uppfylla flutningsþörf nýrrar loftlínu (að lágmarki 550 MVA). Til að uppfylla þá kröfu var valið að miða við tvö strengsett 1200 mm² Al, með samtals flutningsgetum um 600 MVA miðað við algengar íslenskar aðstæður.

Greiningar á hverri 220 kV línu sýndu að hámarks lengd jarðstrengskafla, í hverri línu, væri:

- Blöndulína 3 10 km (af rúmlega 100 km), samt með töluverðum takmörkunum. Launaflsútjöfnun um 45 Mvar.
- Hólasandslína 3 12 km (af u.þ.b. 90 km); huga þarf vel að einangrunarsamhæfni búnaðar. Launaflsútjöfnun um 50 Mvar.
- Kröflulína 3 15 km (af u.þ.b. 120 km). Launaflsútjöfnun um 60 Mvar.

Lögð er áhersla á að þessar niðurstöður eru dregnar af greiningum á hverri línu fyrir sig. Frekari greiningar sýna að ekki er mögulegt að fullnýta „kvótann“ í hverri línu ef um fleiri en eina línu er að ræða.

Nánari greiningar á tímabundnum yfirspennum styðja það enn frekar að lengd þessarra jarðstrengskafla sé hámarks lengd hvers kafla. Fyrir HS3 og BL3 voru með sveiflutíðnir kerfisins nálægt öðrum og þriðja yfirtón sem haft getur í för með sér yfirspennur við spennusetningu spenna. Niðurstaða þeirra greininga er m.a. að óráðlegt sé að leggja hluta BL3 í jarðstreng fyrr en frekari styrkingar í kerfinu hafi átt sér stað.

Þegar kerfið á Norðausturlandi hefur verið samtengt (BL3, HS3 og KR3 samtengdar), með þeim hámarksjarðstrengslengdum sem fundnar hafa verið fyrir hverja línu fyrir sig, er spenna á 220 kV há og kerfið viðkvæmt fyrir truflunum. Spennusetning er áskorun, sérstaklega með tilliti til spennu á Rangárvöllum hvort sem um ræðir spennusetningu BL3 eða HS3. Hámarksstrenglengdirnar hér að framan eru of langar miðað við samtengdan rekstur þar sem launaflsframleiðsla strengja er of há miðað við skammhlaupsafl kerfisins. Tímabundnar yfirspennur reyndust í mörgum tilfellum vera yfir viðmiðunarmörkum, sem í raun þýðir að strengirnir eru of langir.

Ýmsar mótvægisáðgerðir eru til, eins og að beita stýrðri innsetningu til að koma í veg fyrir „zero-miss“ og gera spennusetningu mýkri, notkun sía til þess að minnka bjögun af völdum yfirtóna og hafa áhrif á tímabundnar yfirspennur. Hinsvegar er erfitt að dempa tímabundnar yfirspennur sem eru orsakaðar ef með sveiflutíðnum undir 150 Ω þar sem afskurðartíðni er komin nálægt grunntíðni kerfisins. Tillitlulega litlar líkur er á að ákveðin tilfelli truflana verði að veruleika en oft eru það þau tilfelli sem eru ráðandi við hönnun kerfisins þar sem áhrif þeirra eru svo mikil. En, eins og bent er á hér að neðan, kallar viðbótarbúnaður af þessu tagi meðal annars á aukið flækjustig í rekstri. Sjá nánar um mögulegar mótvægisáðgerðir í Viðauka B.

Lágt skammhlaupsafl á 220 kV á Norðausturlandi er helsta orsök fyrir takmörkun á lengd jarðstrengja. Skammhlaupsafl á Rangárvöllum og í Blöndu er mjög háð tengingu við Fljótsdal og Kröflu á 220 kV. Truflun á þeirri tengingu hefur í för með sér að skammhlaupsafl hríðfellur á Rangárvöllum og í Blöndu.

Skammhlaupsafl kerfisins má auka á tvennan hátt:

- Fjölga virkjunum á Norðausturlandi.
- Bæta tengingar milli Norður- og Suðurlands.

Forsenda þess að mögulegt sé að leggja strengi að einhverju marki í fyrirhuguð 220 kV norðanlands er aukning á skammhlaupsafl. Samt sem áður mun spennustýring á Rangárvöllum verða erfið í tilteknum tilfellum vegna viðvarandi lágs skammhlaupsafls.

Mikilvæg forsenda í þeim greiningum sem lýst er í þessari skýrslu er sú að miðað er við tvö strengsett. Að öllu jöfnu framleiða tvö strengsett tvöfalt meira launafl en eitt sömu gerðar. Því gæti einhver sagt sem svo hvort ekki mætti leggja eitt strengsett núna og annað síðar og ná þannig allt að tvöfalt lengri streng. Því er til að svara að það þarf að taka tillit til lokaútfærslunnar. Sé tvöfalt lengri strengur (eitt sett) lagður í upphafi en hér hefur verið lagt upp með, er óvíst að kerfisaðstæður leyfi lagningu annars jafnlangts setts þegar þörf verður á því. Seinna settið þarf að vera sem næst jafnlangt hinu fyrra og sömu gerðar til þess að koma í veg fyrir hringstrauma og önnur rekstrartengd vandamál.

Eins og komið hefur fram fyrr í þessari skýrslu hefur írska flutningsfyrirtækið EirGrid gengið í gegnum sambærilega greiningu. Þar á bæ hafa menn dregið fram nokkra þætti sem huga þarf að þegar jarðstrengir á hárri spennu eru lagðir inni í flutningskerfi sem samanstendur að mestu af loftlínunum (eins og á við um 220 kV kerfi Landsnets) [2], bls. 217 - 220. Þessir þættir eiga einnig við hér. Þeir helstu eru:

- Notkun jarðstrengja að hluta inni í 220 kV kerfi, sem byggt er að mestu upp af loftlínunum, er tækni sem ekki hefur verið reynd í íslenska flutningskerfinu.
- Búast má við að lagning 220 kV jarðstrengja að hluta muni hafa veruleg áhrif á kerfisreksturinn. Þetta leggur auknar kröfur á herðar kerfisstjórans til þess að tryggja að öryggi kerfisins sé ekki ógnað meðan á viðhaldi stendur eða í truflunum (t.d. vegna veðurs).
- Viðbótarbúnaður, til þess að vinna á móti neikvæðum áhrifum launaflsmyndunar í strengjum (t.d. síur til að draga úr áhrifum yfirtóna), eykur flækjustig í rekstri og þarf breyta og aðlaga í takt við breytingar á kerfinu svo hann haldi fullri virkni.
- Notkun 220 kV loftlína við uppbyggingu flutningskerfis er í fullu samræmi við það sem tíðkast í öðrum Evrópulöndum og er það sem kallast „good utility practice“.
- Það eru kerfisbundin takmörk fyrir því hversu mikið er hægt að leggja af jarðstrengjum innan ákveðins svæðis. Lagning jarðstrengs getur haft áhrif á framtíðarmöguleika til jarðstrengslagna. Þess vegna eru jarðstrengir á hárri spennu helst notaðir við sérstakar aðstæður, t.d. við þveranir árfarvega og í þéttbýli.

Landsnet mun hér eftir sem hingað til fylgjast með þróuninni í jarðstrengslögnum í flutningskerfum. Flutningskerfið þarf að byggja upp í sem mestri sátt og í samræmi við stefnu stjórnvalda.

8 Heimildaskrá

- [1] Working group C4.502, „Power System Technical Performance Issues Related to the Application of Long HVAC cables,” Cigre, 2013.
- [2] EirGrid, „The Grid West Project - Report for the Independent Expert Panel, vol. 1, main report,” EirGrid, 2015.
- [3] *Reglugerð um gæði raforku og afhendingaröryggi.*, nr. 1048/2004 Iðnaðarráðuneytið.
- [4] L. P. A. Ltd, „10344 - PSP019 - AC Cable Studies for Grid West,” EirGrid, 2015.
- [5] *Insulation co-ordination - Part 1: Definitions, principles and rules*, Staðall ÍST EN 60071-1-2006/A1:2010, 2006.
- [6] T. Ohno, „Dynamic Study on the 400 kV 60 km Kyndbyverkæt - Asnæsværket Line,” Aalborg University, Aalborg, 2012.
- [7] N. Gothelf, „TR 0901 Harmonic Study with shunt capacitor banks,” ABB, 2009.
- [8] ABB, „Live Tank Circuit Breakers Application Guide,” ABB, Ludvika, 2013.
- [9] Landsnet, „Jarðstrengir á hárrí spennu í íslenska flutningskerfinu,” Landsnet, 2015.
- [10] F.F. Da Silva, C.L. Bak, U.S. Gudmundsdottir, W. Wiechowski, „Methods to minimize zero-missing phenomenon,” *IEEE Trans. Power Delivery*, b. 25, pp. 2923-2930, 2010.
- [11] F.F. da Silva, C.L. Bak, *Electromagnetic Transients in Power Cables*, London: Springer, 2013.
- [12] R.P. O'Leary, R.H. Harner, „Evaluation of Methods for controlling the Overvoltages produced by the Energization of a Shunt Capacitor Bank,” í *International Conference on Large High Voltage Electric Systems, CIGRÉ*, Paris, 1988.

A. Viðauki – Útjöfnunarpörf launafis í jarðstrengjum

Þegar spenna er sett á jarðstreng framleiðir hann launafl á sama hátt og þéttir. Launafisframleiðslan eykst línulega með lengd strengsins og er í hlutfalli við spennuna í öðru veldi. Helstu vandamál tengd jarðstrengjum er áhrif launafisins á spennuna í kerfinu því að launaflið, sem strengurinn framleiðir, getur valdið óásættanlegri hækkun spennu í kerfinu. Skammhlaupsafl kerfisins (eða styrkur þess) hefur mikla þýðingu í þessu sambandi. Hátt skammhlaupsafl þýðir sterkt kerfi og takmörkuð áhrif launafisins á spennuna í kerfinu. Í íslenska raforkukerfinu er skammhlaupsaflíð víða lágt og mikil launafisframleiðsla getur því haft veruleg áhrif á spennuna, sérstaklega þar sem launaflið frá jarðstrengjum er óstýranlegt.

Til þess að leysa þennan vanda þarf að grípa til aðgerða eins og launafisútjöfnunar, en algengast er að setja upp hliðtengdar spólur sem hafa það eina hlutverk að eyða launaflinu sem myndast í strengnum. Stærð og staðsetningu slíks búnaðar þarf að velja af kostgæfni. Hann þarf að veita nauðsynlega útjöfnun yfir allt vinnusvið strengsins, þ.e. frá lágálagstilviki yfir í háálagstilvik. Sérstakan gaum þarf að gefa því tilviki þegar strengurinn er spennusettur, þ.e. annar endi tengdur og hinn opinn. Við þær aðstæður getur spennan á opna endanum orðið mjög há; jafnvel hærri en búnaður á þeim enda þolir.

Til þess að ráða við þetta gæti þurft að nota þrepskipta spólu. Enn fremur gæti þurft að setja þær takmarkanir að ekki megi spennusetja strenginn nema frá öðrum endanum. Þetta gæti átt við þar sem verulegur munur er á skammhlaupsaflinu milli tengipunkta strengsins. Virkasta staðsetning fyrir útjöfnunarspólur er við enda strengsins. Oft geta þó aðstæður krafist þess að spólurnar séu settar upp í nálægu tengivirki. Rekstrarspenna og lengd strengsins geta enn fremur kallað á að setja þurfi upp útjöfnunarspólur með jöfnu millibili á strengleiðinni.

B. Viðauki – Útskýring á „zero-miss“

B.1. Hvað er zero-miss?

Útjöfnun

Strengir framleiða töluvert magn af launafli (**Q**). Til að fá sem mest raunafli (**P**) flutt á milli spennistöðva og til að stýra spennubrepi², þarf að nota útjöfnun við notkun háspennustrengja.

Til útjöfnunar eru notaðar spólur sem annaðhvort eru fasttengdar eða tengdar með aflrofa. Fasttengd spóla er spennusettt með streng og hefur engan rofa sem aðskilur spóluna frá strengnum. Þegar notuð er spóla tengd með aflrofa, er hægt að spennusetja spóluna án þess að spennusetja strenginn, og öfugt. Í þessu tilfalli eru því minnst tveir aflrofar við annan enda strengsins, þ.e. aflrofi sem tengir strenginn við netið (hér eftir nefndur aflrofi) og rofi sem tengir spóluna við strenginn (hér eftir nefndur spólurofi).

Að nota spólu til útjöfnunar, þýðir að launafli spólunnar (Q_L) skal að hluta eða öllu leyti jafna út launaflið frá strengnum (Q_C).

Zero-miss

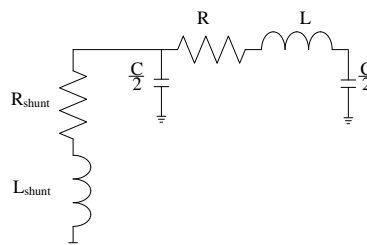
Þegar straumur er rofinn þarf að miða við núllpunkt straumsins í aflrofa. Þó svo rofinn sé opnaður á öðrum tímapunkti, þá mun straumurinn ekki rofna fyrr en hann fer í gegnum núllpunktinn, þar sem ljósboginn rofnar á því augnabliki.

Útjöfnunarspólur fyrir strengi geta í sumum tilfellum orsakað svo stóran DC þátt í straumnum að straumurinn um aflrofann fer ekki í gegnum núll, sem getur valdið standandi ljósboga í lengri tíma. Þetta fyrirbæri nefnist zero-miss og getur í verstu tilfellum valdið sprengingu í aflrofa.

Við ákveðna tegund af útjöfnun háspennustrengja, getur skapast hættuástand, þar sem ekki er mögulegt að aftengja bilaðan háspennustreng vegna zero-miss. Því er mikilvægt að huga að zero-miss fyrirbærinu þegar verið er að hanna strengkerfi með útjöfnun.

Hvað orsakar zero-miss

Það er hægt að notast við einfalt π -líkan af streng tengt við spólu og viðnám til að lýsa streng með útjöfnun. Þetta er sýnt á Mynd .

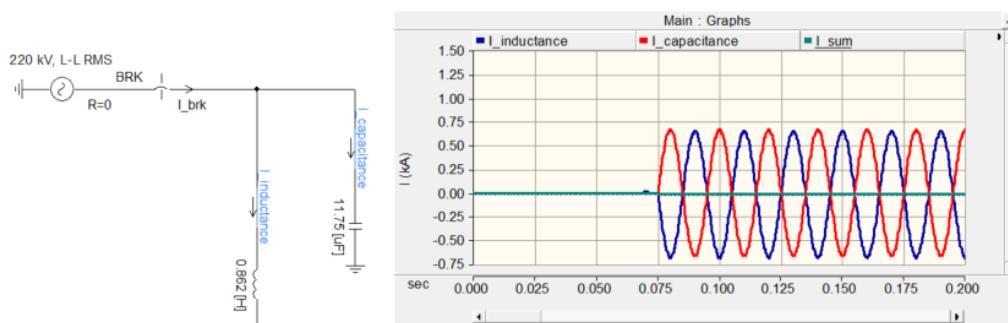


Mynd B-1 - π -líkan af streng með útjöfnun

² Spennubrep er skilgreint sem hin kyrrstæða spennubreyting í tengipunkti þegar aflrofi er opnaður/lokaður.

Til einföldunar við útskýringu á orsökum zero-miss er í fyrstu litið framhjá töpum í spólunni, og því eingöngu notast við L_{shunt} , auk þess sem strengurinn er einfaldaður þannig að eingöngu er horft til fyrsta þéttisins.

Ef þéttir og spóla eru hliðtengd og af sömu stærð (100% útjöfnun), mun straumur þeirra vera jafn stór með 180° fasamun. Straumur um aflrofann, sem tengir spólu og þétti, er



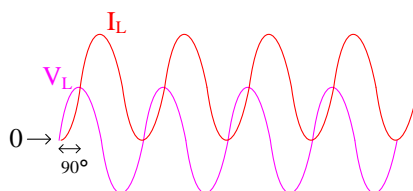
Mynd B-2 - Dæmi um hliðtengingu þéttis (strengur) og spólu (útjöfnun) með sömu "impedans" stærð
 Straumurinn um spóluna er hinsvegar háður því hvenær á straumkúrfunni spólan er tengd, sbr. jöfnu (1):

$$V_s \cos(\omega t) = j\omega L_s I_s$$

$$\Rightarrow I_s = \frac{V_s}{j\omega L_s} \cdot \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2} = \frac{V_s}{\omega L_s} \sin(-\pi + \omega t) \quad (1)$$

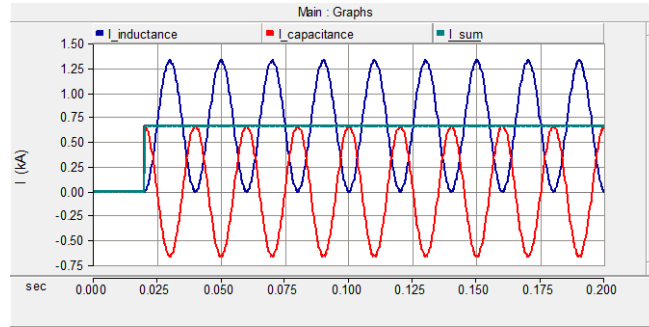
Ef spólan er tengd í $t=0$, þá er $V_s \cos(\omega t)$ í hæsta punkti og $I_s=0$. Í þessu tilfalli er enginn DC liður í straum spólunnar. Ef hinsvegar spólan er tengd í $t=0,005s$, þá er fyrir 50 Hz, $V_s \cos(\omega t)$ í núllpunkti og I_s inniheldur DC lið sem orsakar tvöfalda stærð af straumnum um spóluna. Því er tímápunktur þess hvenær spóla er tengd í kerfi, afgerandi fyrir tilveru zero-miss.

Í mörgum tilfellum er þessum tímápunkti ekki stýrt, en sé það gert, er algengast að miða við núllpunkt spennunnar í netinu. Þetta er gert til að takmarka yfirspennur í netinu, sem geta haft áhrif á stöðugleika þess. Hinsvegar mun í þessu tilfalli, spólan byrja að hlaðast þegar spennan yfir hana er í núllpunkti. Þar sem fasamunurinn á spennunni yfir spóluna og straumnum í henni er 90° , þá mun straumurinn vera í hæsta punkti 90° á eftir spennunni, eða þegar spennan yfir spóluna er í núllpunkti, eins og sýnt er á Mynd .



Mynd B-3 - Straumurinn í gegnum spólu sem er tengd í núllpunkti spennunnar yfir spóluna

Í þessu tilfalli inniheldur straumurinn um spóluna DC þátt sem orsakar að aflrofastraumurinn á Mynd mun aldrei ná núllpunkti heldur vera eins og sýnt er á Mynd .



Mynd B-4 - Straumurinn um þétti, spólu og aflrofa frá Mynd B-2 þegar notast er við tengingu í núllpunkti netspennunnar.

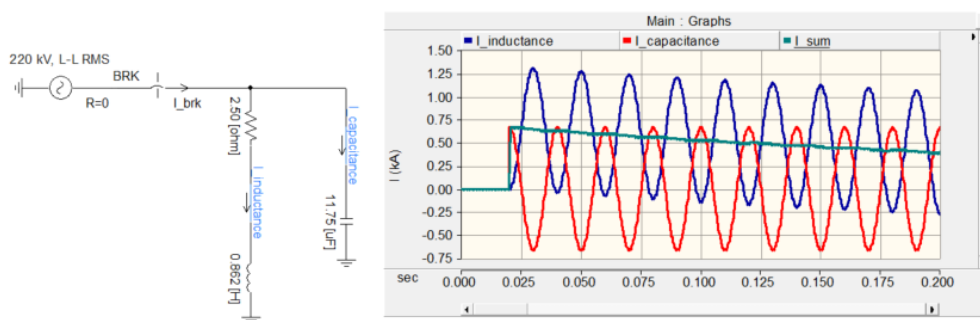
Í dæminu að ofan var gert ráð fyrir að spólan væri tapsfrí, en hið rétta er að spólan mun alltaf innihalda viðnám sem takmarkar DC lið spólunnar. Ef R_{Shunt} frá Mynd er því bætt við, þá er hægt að reikna straum spólunnar eins og sýnt er í jöfnu (2), þar sem t_0 er tímápunktur spennusetningar.

$$\begin{aligned}
 V_S \cos(\omega t) &= R_S I_S + L_S \dot{I}_S \\
 \Rightarrow I_S &= \frac{V_S}{L_S} \int \cos(\omega t) dt - \frac{R_S}{L_S} \int I_S dt = \frac{V_S}{L_S} \cdot \frac{\sin(\omega t)}{\omega} - \frac{R_S}{L_S} \int I_S dt \\
 V = 0: I_S &= I_{S0} e^{-\frac{R_S t}{L_S}} \\
 V \neq 0: I_S &= \frac{V_S}{\sqrt{R_S^2 + (\omega L_S)^2}} \cos\left(\omega t - \tan^{-1}\left(\frac{\omega L_S}{R_S}\right)\right) \\
 \text{með } I_{S0} &= -\frac{V_S}{\sqrt{R_S^2 + (\omega L_S)^2}} \cos\left(\omega t_0 - \tan^{-1}\left(\frac{\omega L_S}{R_S}\right)\right)
 \end{aligned} \tag{2}$$

Því er hægt að reikna strauminn í aflrofanum eins og sýnt er í jöfnu (3), þar sem DC þátturinn er háður dempunarstuðlinum $\tau = L_S / R_S$.

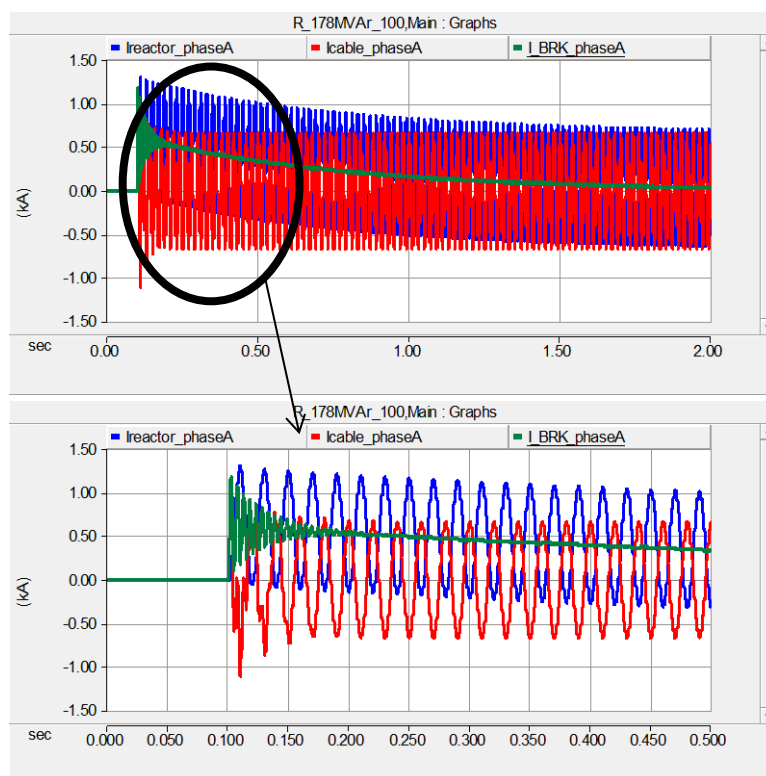
$$I_S = \frac{V_S}{\sqrt{R_S^2 + (\omega L_S)^2}} \cos\left(\omega t - \tan^{-1}\left(\frac{\omega L_S}{R_S}\right)\right) + I_{S0} e^{-t \frac{R_S}{L_S}} \tag{3}$$

Dæmi, þar sem töp spólunnar eru tekin með, er sýnt á Mynd . Það skal tekið fram hér, að stærð R_S er tilbúin og er óeðlilega stór, eingöngu til að sýna virkni dempunar. Viðnám spólunnar er að sjálfsögðu alltaf háð stærð hennar, en raunverulegri gildi eru ca. 0,4 Ω eða minna sem orsakar mun minni dempun.



Mynd B-5 - Dæmi um hliðtengingu þéttis og spólu með töpum, með spennusetningu í núllpunkti netspennunnar.

Strengur er ekki eingöngu uppbygður af þétti, heldur óendanlega mörgum þéttum, viðnánum og spólum sem margir π -liðir. Þannig að ef strengurinn er líkanagerður rétt (í stað eins þéttis), mun aflrofastraumurinn verða líkari raunveruleikanum, eða eins og sýnt er á Mynd . Á þessari mynd má sjá, að þrátt fyrir töp í spólu og rétta líkanagerð strengs, mun straumurinn um aflrofann ekki ná núllpunkti fyrr en 2,5 sekúndum eftir spennusetningu (eða 125 sínussveiflum). Þessi líkanagerð er fyrir 100% útfjöfnun á 220 kV, 50 km löngum 2000 mm² Al streng í flatrí lögn. Hér ber að taka fram, að ekki er hægt að aftengja streng á meðan núllpunkti í straumnum um aflrofann er ekki náð. Einnig er mikilvægt að vita að strengur er líkanagerður þannig að impedansinn í netinu er byggður á tilbúnum gildum. Önnur gildi í netinu geta minnkað eða aukið dempun (háð réttri stærð) og þar með haft áhrif á tímalengdina fyrir zero-miss.



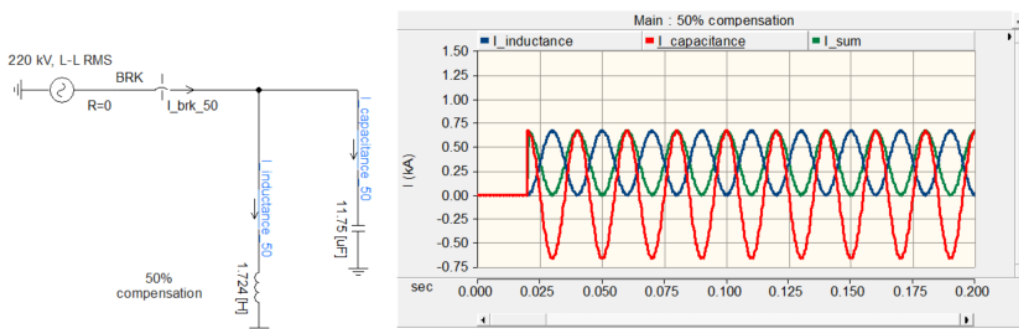
Mynd B-6 - Straumur um streng, spólu og aflrofa fyrir raunverulega líkanagerð netkerfis með háspennustrengjum auk útfjöfnunar.

Eins og sýnt er að ofan, hefur stærðarhlutfall spólu og strengs afgerandi áhrif á núllpunkt straumsins í aflrofanum. Séu spóla (Q_L) og strengur (Q_C) jafn stór, þ.e. 100% útjöfnun, eru straumarnir um streng og spólu af sömu stærð með 180° fasamun eins og sýnt er á Mynd . Fyrir streng sem er með minni útjöfnun, mun straumurinn um þéttinn vera stærri en um spóluna og þar af leiðandi mun DC-þátturinn í aflrofanum vera minni.

Í jöfnu (4) má sjá hvernig AC straumurinn um aflrofann er háður samhengi á milli stærðar rýmdar í streng og spani í spólu. Sé strengurinn með 100% útjöfnun, er $I_{aflrofi_{AC}} = 0$.

$$I_{aflrofi_{AC}} = V_S \left(\frac{1}{\omega L_S} - \omega C_{strengur} \right) \quad (4)$$

Sé notast við 50% útjöfnun, mun straumurinn um spóluna einungis vera helmingurinn af straumnum um strenginn og því mun summan, eða straumurinn um aflrofann, vera AC með lægsta punkt í núlli (þ.e. hann inniheldur fastan DC-lið) eins og sýnt er á Mynd . Þetta þýðir að tæknilega séð er 50% útjöfnun stærsta útjöfnun sem hægt er að nota til að tryggja að zero-miss geti ekki skapast. Sé hinsvegar næg dempun í netinu, getur í sumum tilfellum verið mögulegt að notast við meiri útjöfnun, eða allt að 60%, án þess að zero-miss skapist.



Mynd B-7 - Dæmi um þétti með 50% útjöfnun

Vandamál vegna zero-miss

Það er mikilvægt að nefna, að zero-miss er eingöngu vandamál sé reynt að aftengja bilaðan streng áður en núllpunkti aflrofastraumsins er náð. Oftast er núllpunktinum náð eftir einhverjar sekúndur (getur verið allt að 10-20 sekúndur). Því er zero-miss ekki vandamál, komi upp bilun í streng sem hefur verið í notkun í lengri tíma. Sé hinsvegar bilun á streng sem á að spennusetja, getur komið upp staða, þar sem bilaður strengur er tengdur inn á netið, og ekki hægt að aftengja hann í einhverjar sekúndur, eða það sem er verra, að aflrofi reyni að aftengja strax aftur en að ljósbogi sem þá skapast sprengi aflrofann.

Einnig er mikilvægt að nefna, að zero-miss er eingöngu vandamál sé reynt að spennusetja streng með 1 fasa eða 2 fasa bilun. Þetta er vegna þess að bilunarstraumurinn er svo stór að hægt er að aftengja bilaða fasann, en ekki heilbrigðu

fasana. Það eru því heilbrigðu fasarnir og/eða aflrofi á heilbrigðu fösunum sem geta skaðast vegna zero-miss.

Þegar bilaður strengur er spennusettur, mun liðavörnin senda merki um að aflrofi skuli aftengja alla þrjá fasa. Vegna stærðar bilunarstraumsins, mun aflrofi bilaða fasans aftengja án vandamála. Hinsvegar mun ljósbogi í aflrofa heilbrigðu fasanna ekki slokkna fyrir en straumurinn er í núllpunkti.

Framleiðendur aflrofa hafa sagt að til séu rofar sem þola 2,5*rekstrarstraum í allt að 45 msek. Það er því mikilvægt að tryggja að ljósboginn geti ekki staðið í lengri tíma vegna zero-miss.

Hanna þarf línur með strengjum með tilliti til zero-miss, hvort sem er með lausn þar sem ekkert er gert og unnið er með áhættugreiningu og prófanir á strengjum, eða með því að fjarlægja, minnka eða höndla zero-miss á einn eða annan veg.

Sértilfelli við siphon kerfi

Siphon kerfi er heiti á línu sem ekki er eingöngu uppbyggð af annaðhvort loftlínu eða strengjum, heldur inniheldur bæði loftlínu og strengi. Það eru til margar útfærslur af siphon kerfi, þar sem sú algengasta er að notast sé við strengi í eingöngu lítinn hluta línunnar, t.d. inn á spennustöðvar eða í gegnum viðkvæmt umhverfi, gegnum þéttbýli eða ár, og restin af línunni er loftlína.

Sömu reglur gilda um zero-miss fyrir línur sem eingöngu innihalda strengi og fyrir siphon línur. Hinsvegar getur í sumum tilfellum verið meiri dempun í loftlínukerfinu, sem gerir það að verkum að hægt er að nota útjöfnun allt að 60% án þess að zero-miss sé til staðar.

Í flestum kerfum með loftlínum, er eðlilegt að notast við einfasa sjálfvirka endurlökun. Þetta þýðir, að komi upp 1-fasa bilun á loftlínu, er línan aftengd í ákveðinn tíma (t.d. 50 msec) og svo prófað að spennusetja aftur. Sé bilunin horfin er ekkert fleira aðhafst, sé bilunin hinsvegar áfram til staðar, er línan aftengd aftur án þess að spennusetja fyrir en búið er að finna og laga bilunina.

Þar sem strengir eru grafnir í jörðu og ekki með lofteinangrun, mun 1-fasa bilun ekki geta horfið við að nota einfasa sjálfvirka endurlökun. Hinsvegar getur strengurinn bilað meira, eða heilbrigðir fasar bilað, sé notast við sjálfvirka endurlökun.

Í sumum tilfellum, er valið að hafa sjálfvirka endurlökun í siphon kerfum, sem þá er byggt á áhættumati. Td. ef strengurinn er <10% af heildarlengd línunnar, og ef metið er svo að mikilvægi línunnar sé það lítið, vegna möskvaðs nets, að hægt sé að lifa með langvarandi bilun á streng.

1-fasa sjálfvirk endurlökun notast eingöngu á línu sem hefur verið í venjulegum rekstri um tíma, en ekki þegar verið er að spennusetja línu. Það er því ekki neinn DC liður á neinum fasa þegar notast er við einfasa sjálfvirka endurlökun og zero-miss er ekki vandamál.

Aðgerðir til að koma í veg fyrir „zero-miss“

Mögulegt er að sporna gegn „zero-miss“ með ákveðnum aðferðum. Yfirlit yfir þessar aðferðir er að finna í doktorsritgerð frá Álaborgarháskóla [6]. Ekki verður farið djúpt í þessar mótvægisáðgerðir heldur einungis stiklað á stóru. Allar þessar mótvægisáðgerðir eiga það sameiginlegt að auka flækjustig í rekstri kerfisins og minnka áreiðanleikann.

Tafla gefur yfirlit yfir mótvægisáðgerðir fyrir „zero-miss“. Allar aðferðirnar hafa verið notaðar fyrir utan mótvægisáðgerð 4.

Mótvægisáðgerð númer 1 hefur verið notuð oftast af þessu aðferðum. Mótvægisáðgerð nr. 2 er talsvert notuð fyrir innsetningu á spennum til þess að takmarka innhleyppistraum.

Mótvægisáðgerð 3 er meira notuð á EHV strengjum en HV strengjum þar sem þörf er á einpóla rofum ásamt mismunarstraumsvörn. Ef bilaður strengur er spennusettur er aflrofi þess strengs opnaður en rof á heilbrigðum strengjum tafið um 10 sekúndur þegar jafnstraumspátturinn hefur verið dempaður. Þar sem talsverður straumur verður ósamhverfur er nauðsynlegt að skoða hvort nálægir rafalar þoli slíkt ástand.

Mótvægisáðgerð 4 hefur aldrei verið notuð og þörf er á að þróa aflrofa með réttri stærð af viðnámi til þess að dempa jafnstraumspátt innhleyppistraums.

Mótvægisáðgerð 5 felur í sér viðnám sem er raðtengt við spólu þegar strengur er spennusettur. Viðnámín þurfa að vera af réttri stærð til að dempa jafnstraumspáttinn og eftir spennusetningu er viðnám framhjá tengt.

Mótvægisáðgerð 6 felur í sér að spólur þurfa að hafa aflrofa. Erfitt getur verið að nota þessa aðferð ef sístæð spenna er mjög há og við innsetningu verður spennuþrep.

Tafla B-1 – Mótvægisáðgerðir vegna „zero-miss“

Mótvægisáðgerð		
1	Stýrð innsetning	Þörf á einpóla aflrofum ásamt mismunarastraumsvörn. Þörf á rofa með hærri „leading“ rofgetu í samræmi við IEC 62271-100. Einpóla aflrofar fyrir spólur.
2	Samhæfð innsetning	Getur valdið hærri yfirspennum og þarfnast einpóla rofa.
3	Töfð opnun heilbrigðra fasa	Þörf á einpólarofabúnaði og mismunarstraumsvörnum. Getur verið illmögulegt nálægt rafólum.
4	Aflrofi með forinnsetningarviðnámi	Ekki staðalbúnaður og getur verið þörf á að þróa nýja aflrofa.
5	Viðbótarviðnám í spólum til spennusetningar	Þarf stýringu til þess að framhjá hleypa við viðnám eftir spennisetningu
6	Spennusetja spólu eftir að strengur hefur verið spennusettur	Veldur hærri sístæðum yfirspennu og spennuþrepi

LANDSNET

LANDSNET HF. - GYLFAFLÖT 9 - 112 REYKJAVÍK - SÍMI 563 9300 - LANDSNET@LANDSNET.IS