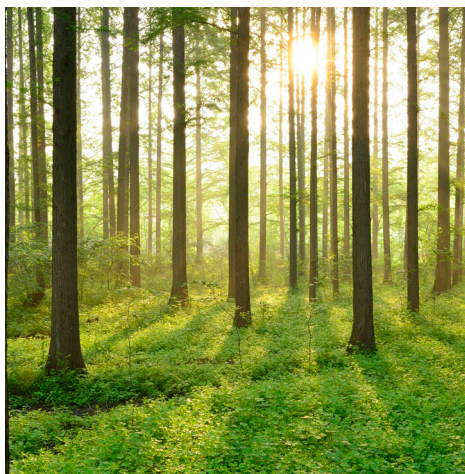


MÄTNING AV KÄLLIMPEDANS

RAPPORT 2019:634



Mätning av källimpedans

Metoder och verifiering

TORD BENGTTSSON, ROBERT SAERS, SVANTE SJÖBLOM, ROBERT ERIKSSON, MAGNUS
LOMMERDAL, ANDERS GRANDELL

ISBN 978-91-7673-634-0 | © Energiforsk december 2019

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

I ett kraftsystem som är under förändring, finns det behov av att utveckla nya metoder för att bibehålla ett stabilt system. Med en ökande andel intermittent produktion, som i sin tur leder till nya flöden i elnätet, är det därmed av största vikt att undersöka befintliga verktyg och i en del fall även utveckla nya. Därför har detta projekt tittat på metoder för att mäta källimpedansen, en viktig parameter vid nätdimensionering, och även tagit fram ett nytt verktyg för att automatisera denna process. Resultatet gör det möjligt för nätägare att utöka sin verktygslåda när det gäller att beräkna källimpedansen vid viktiga punkter i sina nät.

Projektet har genomförts inom ramen för Energiforsks industriforskningsprogram Underhåll av elnät, och referenspersoner från programmets styrgrupp har varit

- Hans-Erik Carlsson, E.ON Energidistribution
- Magnus Lommerdal, Ellevio

Programmet Underhåll av elnät finansieras av ABB, Bodens Energi Nät, Borås Energi Nät, C4 Elnät, Ellevio, Eskilstuna Energi & Miljö, Falu Energi & Vatten, Göteborg Energi, Elinorr Ekonomisk förening som består av 16 elnätföretag, E.ON Energidistribution, Jämtkraft Elnät, Jönköping Energi Nät, Karlstads El- och Stadsnät, Kraftringen Elnät, Luleå Energi, Skellefteå Kraft Elnät, Kungälv Energi, Mälarenergi Elnät, Nacka Energi, Svenska kraftnät, Tekniska verken i Linköping, Pite Energi, Umeå Energi Elnät, Vattenfall Eldistribution och Öresundskraft.

Lennart Kjellman,
Programansvarig Underhåll av elnät
Stockholm 9 december 2019

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

Källimpedansen är en viktig faktor vid dimensionering och drift av kraftnät, den påverkar inte bara valet av brytare utan också skyddsinställningar och operatörens beslut vid driftomläggningar.

I denna rapport beskrivs hur in- och urkopplingar av shuntreaktorer kan användas för att bedöma källimpedansen. Ett relativt stort mätunderlag från Svenska kraftnät indikerar att uppskattningar från mätdata är konsistenta med beräkningar och av ungefär samma kvalitet. En fördel med mätningar är att de direkt speglar kraftsystemet vid mättidpunkten medan beräkningar kräver omfattande information om systemets tillstånd som levererad effekt från alla generatorer och om vissa kraftledningar är ur drift.

Rapporten beskriver översiktligt några olika metoder för att bedöma källimpedansen från vågformsregistreringar vid reaktorkopplingar och diskuterar också vilka krav som ställs för att kunna uppskatta källimpedansen från liknande mätdata. I detta sammanhang nämns också alternativa möjligheter att kunna göra liknande uppskattningar.

I projektet har ett fristående analysverktyg utvecklats som använts av Svenska kraftnät för att leverera de resultat som presenteras.

Slutligen ger Svenska kraftnät och Ellevio sina synpunkter på värdet av källimpedansmätningar för sina respektive verksamhetsområden.

Summary

The source impedance is an important property for dimensioning and operation of power systems. It does not only influence the selection of breakers, it also affects protection settings and operator decisions.

This report describes how connections and disconnections of shunt reactors can be used to estimate the source impedance. A relatively large data set from Svenska kraftnät indicates that estimates from measurements are consistent with calculations and of about the same quality. An advantage with measurements is that they directly reflect the system state at the measurement occasion whereas calculations require extensive information on generator load and which power lines that are in service.

A few different methods to estimate the source impedance from waveforms recorded during reactor operations are briefly described. The requirements for similar measurements are discussed and a number of alternative possibilities are mentioned.

A stand-alone analysis tool has been developed in this project which has enabled Svenska kraftnät to perform the analysis presented.

Views from Svenska kraftnät and Ellevio on the value of source impedance measurements for their respective areas of activity are also presented.

Innehåll

1	Introduktion	7
2	Uppskattning av Källimpedans	8
2.1	Grundläggande aspekter	8
2.2	Enkel uppskattning av källimpedansens belopp	10
2.3	Uppskattning av komplex källimpedans	11
2.3.1	Med amplitud och fas estimat	11
2.3.2	Med vågformsförändring	12
2.4	Analysverktyg	14
3	Insamling av mätdata	15
3.1	Grundläggande krav	15
3.2	Möjliga mätscenarior	16
4	Resultat	18
4.1	Data från Svenska kraftnät	18
4.1.1	Station 3	18
4.1.2	Station 5	19
4.1.3	Analys av de tre metoderna	21
4.2	Data från Ellevio	24
5	Slutsatser	27
5.1	Svenska kraftnäts synpunkter	27
5.2	Synpunkter från Ellevio	28

1 Introduktion

Källimpedansen, eller nätstyrkan, kortslutningsströmmen, är en viktig faktor i dimensioneringen av kraftnät och ställverk. Den påverkar inte bara valet av storlek på brytare utan även skyddsinställningar. Också planering och drift av stamnätet behöver ta hänsyn till källimpedansen när operatörer kopplar spänningsreglerande utrustningar för att hålla spänningen inom tillåtet intervall. Nya nätkoder träder i kraft inom EU och källimpedansen är en av många delar som innefattas. Traditionellt har det ansetts tillräckligt att enbart beräkna källimpedansen eftersom effektförflödet varit enkelriktat från högre spänningar och nedåt. Med förnybar generering på olika spänningsnivåer är detta inte längre fallet och den blir därmed allt svårare att uppskatta. Den förnybara genereringen kan dessutom innebära att källimpedansen varierar över tid beroende på vilka kraftkällor som är i drift.

I detta projekt har undersökts om källimpedansen kan uppskattas från strömmar och spänningar uppmätta under inkoppling av större laster som reaktorer, kondensatorer och transformatorer. Utvärderingar har gjorts på ett stort antal registreringar från Svenska kraftnät och under provning av en av Ellevios reaktorer.

Speciellt Svenska kraftnät ser ett behov av källimpedansmätningar på ett flertal punkter i svenska stamnätet. Troligtvis ser andra kraftbolag samma behov, speciellt i ljuset av hotande kapacitetsproblem i Stockholmsområdet och andra, snabbt växande, regioner. Kapacitetsbegränsningar i effekt bör förekomma i större skala vid underhållsarbeten, då en eller flera komponenter är fränkopplade, än vid normal drift. Mätning av källimpedans bör därför vara av intresse ur ett driftsperspektiv i nät med sedan tidigare hög belastning.

Denna rapport beskriver, i kapitel 2, den grundläggande teorin för uppskattning av källimpedans och översiktligt de använda analysmetoderna. I kapitel 3 diskuteras vilka typer av händelser som kan vara lämpliga och vilka krav som måste ställas. Kapitel 4 presenterar mätresultat och kapitel 5 sammanfattar de erfarenheter som uppnåtts.

2 Uppskattning av Källimpedans

Varje praktisk spänningskälla har en inre impedans, vilket innebär att spänningen sjunker då strömmen ökar. Den maximala strömmen begränsas alltså av spänningskällans inre impedans. I kraftsystemet, liksom i många andra fall, är det inte givet, eller kan inte ens förväntas, att impedansen är konstant oberoende av last eller tid. Tvärtom, i kraftsystemet finns många spänningskällor, alla dessa är inte aktiva hela tiden och den effektiva källimpedansen i en punkt i nätet skapas av de aktiva källorna tillsammans. Dessutom har alla spänningskällor i kraftsystemet någon form av reglering för att anpassa spänningen efter lasten både för att förse systemet med korrekt spänning och för att skydda sig själva i händelse av för stora laster. Traditionella generatorer och modern kraftelektronik kräver olika typer av regleringsfunktion som kan ha väsentligt olika egenskaper och reaktionstid.

I detta kapitel presenteras de grundläggande aspekterna av källimpedansuppskattningar, nästa kapitel diskuterar själva mätningarna mer utförligt. Sedan presenteras de uppskattningsmetoder som använts i detta projekt, bedömningen har nämligen varit att mer komplexa metoder behöver kompletteras med enklare och lättförståeligare för att verifiera resultaten, även om de enklare metoderna inte ger samma detaljinformation som de mer komplexa.

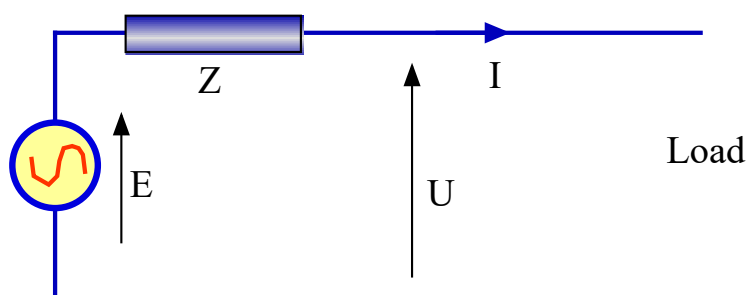
2.1 GRUNDLÄGGANDE ASPEKTER

Figur 1 visar en enkel elektrisk krets där en spänningskälla kopplas via en impedans till en last. Spänningskällan antas ideal och håller alltid spänningen E men spänningen vid mätpunkten, U , kommer att bero på lastströmmen I :

$$U = E - Z I \quad (1)$$

En förändring av strömmen, ΔI , kommer alltså att ge en spänningsförändring ΔU :

$$\Delta U = - Z \Delta I \quad (2)$$



Figur 1: En enkel elektrisk krets för att definiera källimpedansen Z .

Källimpedansen, Z , fås då ur:

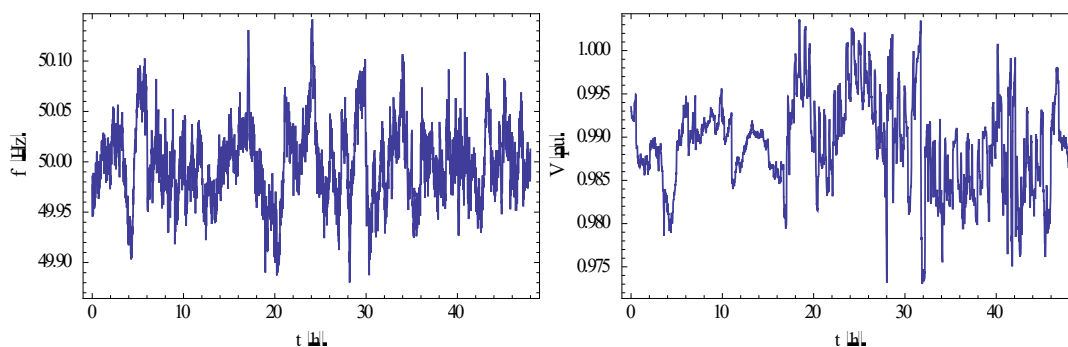
$$Z = - \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (3)$$

Detta är den enkla grundläggande definitionen av källimpedans som vid första påseende verkar rättfram att tillämpa i kraftsystemet. Allt man behöver är att observera en strömförändring och notera den spänningsförändring som

uppkommer. I ett verkligt kraftsystem är detta emellertid inte helt enkelt beroende på ett antal samverkande faktorer:

- Kraftsystemet är starkt vilket betyder att källimpedansen är liten och därmed är spänningsförändringarna små.
- Kraftsystemet förändras hela tiden beroende på att laster kopplas in och ur, ökar och minskar. Varken frekvensen eller spänningen är konstant utan håller sig inom givna gränser genom regleringsfunktioner.
- Den vanliga metoden att uppskatta amplitud och fas på strömmar och spänningar är känslig för frekvensförändringar och kan bara anses tillförlitlig på procentsnivå.

Den första punkten kan belysas genom att källimpedansen på 220 kV nivån är i storleksordningen 10Ω och att det därför krävs en strömförändring på 220 A, cirka 50 MVA, för att ge 1 % spänningsförändring.



Figur 2: Illustration av hur frekvens och spänning kan variera i kraftnätet över en 48-timmars period.

De två andra punkterna illustreras av figur 2 som visar att både frekvensen och spänningen varierar inom ett spann på några procent. Därför blir det svårt att säkert uppskatta storleken på spänningssteg i samma skala.

För att kunna uppskatta källimpedansen krävs alltså aktningsvärda strömförändringar som dessutom måste ske snabbt, dels för att de naturliga variationerna inte skall dölja spänningsförändringen och dels för att spänningskällornas reglering inte skall hinna agera. Det sista för att källspänningen E bestäms av spänningskällornas reglering och denna får inte ändras under mätningen. Om strömförändringen motsvarar en tillräckligt liten del av den totala lasten på systemet kan förändringen ligga inom regulatorernas dödband och då är spänningsregleringen inget problem. Kapitel 3 diskuterar olika möjligheter för mätningar.

En mätning för att uppskatta källimpedans är alltså en registrering av ström och spänning under en kraftig och snabb strömförändring. Sådana registreringar kan till exempel göras med en störningsskrivare i ett digitalt reläskydd. Det som krävs är att reläskyddet är konfigurerat att spara sammanhängande strömmar och spänningar i störningsregistreringen ("Disturbance Record" på engelska) samt att en registrering initieras av in- eller urkoppling av en större last, till exempel genom att kontrollsignalen till brytaren initierar registreringen. Ifrån reläskydd levereras störningsregistreringar standardmässigt i form av standardiserade COMTRADE

filer som kan innehålla ett stort antal vågformer och där varje vågform beskrivs av en vektor av ström eller spänningsvärden med ett fixt tidsintervall. Tidsintervallet är typiskt 1 ms eller kortare och inspelningarna är typiskt några sekunder långa.

Det är också möjligt att använda annan utrustning än störningsskrivare för de registreringar som krävs och i detta projekt har vi delvis använt laboratorieinstrument med egenutvecklad programvara för detta. Grundresultatet är emellertid detsamma: digitaliserade vågformer av strömmar och spänningar under en kraftig strömförändring.

2.2 ENKEL UPPSKATTNING AV KÄLLIMPEDANSENS BELOPP

Här beskrivs en enkel metod att uppskatta källimpedansens *belopp* baserat på en vanlig metod att uppskatta amplituden av en sinusformad signal med fix frekvens. I nästa avsnitt beskrivs två olika metoder att uppskatta både real- och imaginärdel av källimpedansen. Då dessa metoder nödvändigtvis är mer komplicerade, är den enkla metoden som beskrivs här viktig för att verifiera dem.

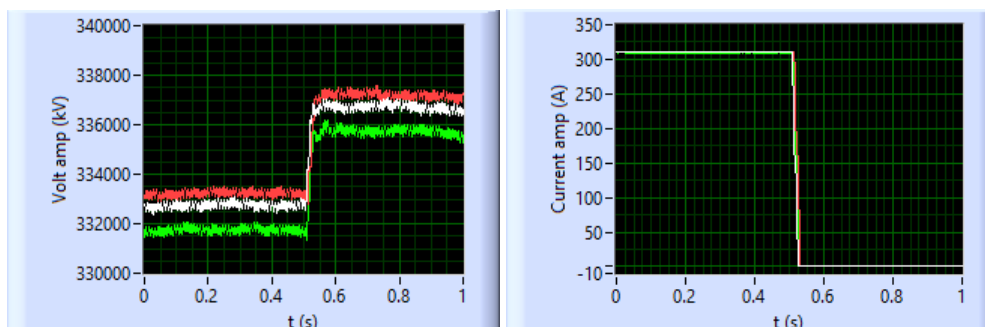
För att få fram källimpedansen ur ekvation 3 krävs att åtminstone beloppet av förändringen i U och I kan skattas. Den vanliga metoden i reläskydd och andra tillämpningar är den så kallade Digitala Fourier Transformen (DFT) som ger amplituden för frekvensen $f_0 = \frac{1}{N t_s}$ i den digitaliserade signalen s som är samplad med tidsintervallet t_s :

$$DFT[s](t_i) = \frac{2}{N} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} s(t_{i-k}) e^{-2\pi j k/N} \quad (4)$$

N är alltså antal sampel per period av den nominella frekvensen f_0 . En fördel med DFT är att den är snabb, den behöver bara använda signalvärden under en period för att ge amplitudvärden men man kan notera att frekvensen f_0 är given på förhand och om signalens frekvens avviker lite från f_0 får man ett varierande fel i amplituden som är proportionellt mot relativa frekvensavvikelsen.

Figur 3 visar DFT amplituder för ström och spänning vid fränkoppling av en reaktor på 400 kV nivån. Här sjunker strömmen i fas 3 från 309.5 A till 0 samtidigt som spänningen stiger från 331.7 till 335.6 kV, dvs ca 1 %. Ekvation 3 ger då den uppskattade källimpedansen:

$$|Z| = -\frac{331.7-335.6 \text{ kV}}{309.5-0 \text{ A}} = 12.6 \Omega \quad (5)$$



Figur 3: DFT amplituder vid fränkoppling av en reaktor på 400 kV nivån. De tre faserna visas med olika färg.

Noggrannheten i denna uppskattning bestäms huvudsakligen av spänningsamplituden. I figur 3 syns det tydligt att det finns en osäkerhet som delvis beror på frekvensavvikelse, frekvensen är vid detta tillfälle cirka 49.95 Hz, dvs 0.1 % från nominell och detta ger en varierande amplituduppskattning som är en väsentlig del av det observerade spänningssteget. Då felet oscillerar runt ett medelvärde ger en medelvärdesbildning över en eller flera perioder ett värde som är noggrannare. I resultaten som presenteras i kapitel 4 har ett medelvärde över ca 0.5 s använts.

Ett sätt att beräkna osäkerheten i denna uppskattning är att använda standardavvikelse i DFT-amplituderna för spänning och ström en tid, 0.0 – 1 s, för och efter kopplingen. Osäkerheten i impedansskattningen ges då av

$$|dZ| = \left| d \left[\frac{U}{I} \right] \right| \approx \left| \frac{dU}{I} \right| + \left| \frac{U}{I^2} dI \right| = \frac{(dU + \frac{U}{I} dI)}{I} \quad (6)$$

Där U och I är steget i spänning respektive ström och dU och dI är standardavvikelse i dessa amplituder. Ett annat sätt vore att, som i metoderna nedan, beräkna källimpedansen för varierande tid från steget med medelvärden för ett fåtal perioder och direkt använda standardavvikelsen i Z. Då skulle osäkerheten från frekvensavvikelser minskas men i de analyser som gjorts, har ekvation 6 använts.

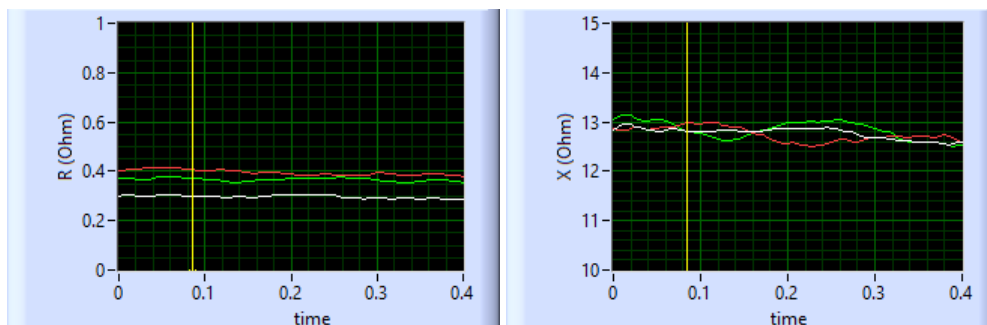
Denna metod ger en enkel och intuitiv uppskattning av källimpedansen som är direkt relaterad till den observerade förändringen i spänningsamplitud och är därför viktig. I princip kan man tänka sig att använda RMS amplituder i stället men det ger inga fördelar och frekvensavvikelser kommer att påverka RMS amplituderna på ungefär samma sätt som DFT amplituderna.

2.3 UPPSKATTNING AV KOMPLEX KÄLLIMPEDANS

Beroende på avsikten med mätningen, kan det vara nog med källimpedansens belopp. I vissa tänkbara tillämpningar behöver man skatta real- och imaginärdel separat för att till exempel få en uppfattning om aktiva förlusten. Metoderna som beskrivs i detta avsnitt ger ett komplext värde på impedansen med separat real- och imaginärdel.

2.3.1 Med amplitud och fas estimat

Denna metod är en direkt utveckling av den enkla metoden ovan. Skillnaden är att i stället för endast amplitudbelopp används komplexvärdet av amplituden som fås ur ekvation 4. Detta ger emellertid upphov till komplikationer då komplexvärdets fas roterar med frekvensen och man behöver relatera fasen vid en tidpunkt före kopplingen till en tidpunkt efter. Tekniken för detta blir relativt komplicerad med komplex algebra och brusreduceringsmetoder och beskrivs därför inte här.

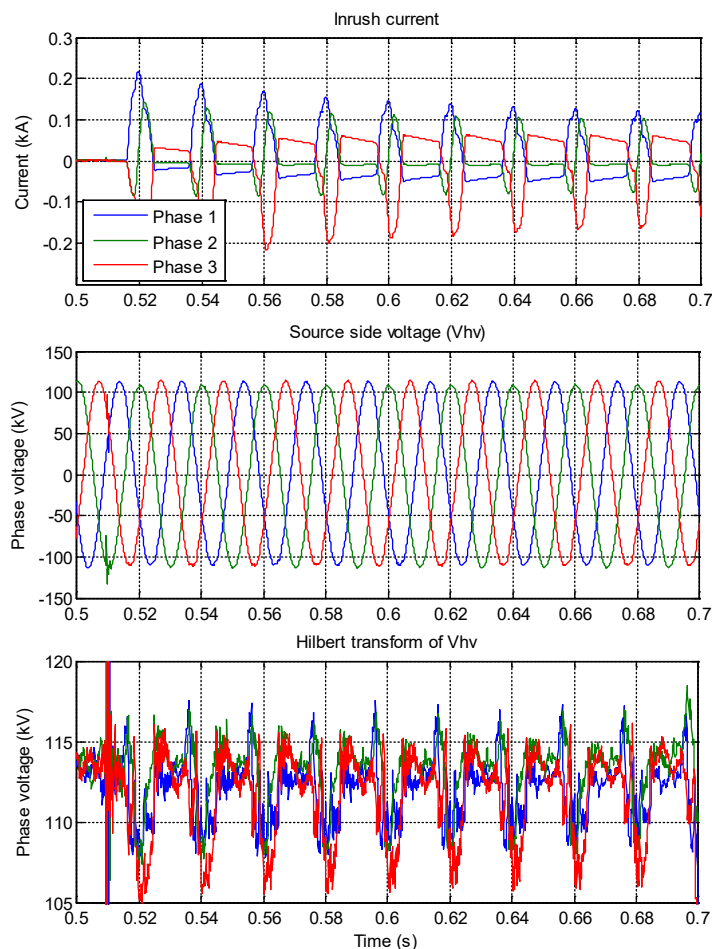


Figur 4: Skattning av källimpedansens real och imaginärdel från kopplingen som visas i figur 3. Tidsaxeln indikerar avstånd från steget.

Metoden kan exemplifieras med de spännings- och strömsteg som visas i figur 3. Här framgår det att amplituderna är relativt konstanta från ett par perioder efter steget och det är därför möjligt att förbättra noggrannheten med medelvärden. Figur 4 visar hur skattningen av real och imaginärdel varierar för medelvärden över 4 perioder tagna med ökande avstånd från steget. Här syns en viss måttlig variation som används för att uppskatta noggrannheten i skattningen. Det slutliga skattade värdet tas från medelvärden ett antal perioder från kopplingen när de transienta effekter som ibland orsakas har klingat ut, denna tidpunkt indikeras i figur 4 av de gula linjerna.

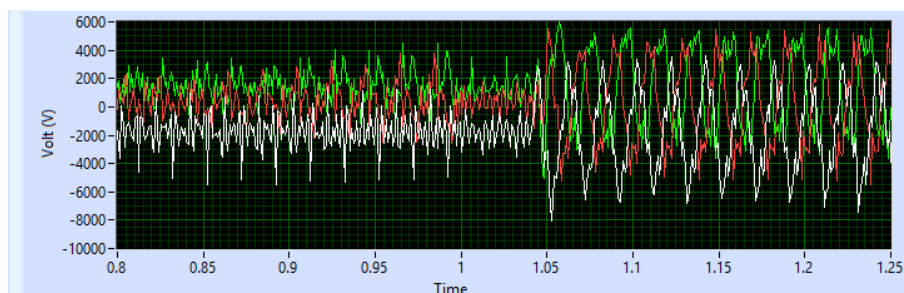
2.3.2 Med vågformsförändring

Detta är en helt annorlunda och betydligt mer beräkningskrävande teknik. Den är dock intressant i detta sammanhang eftersom den inte kräver att förändringarna är i nätfrekvensens sinusformade amplitud utan kan se ut i princip hur som helst. Ett viktigt exempel på sådana förändringar är inrusningsström när en transformator kopplas in; då kan strömtoppar som är betydligt större än nominell ström komma varannan halvperiod. Sådana strömtoppar ger också upphov till spänningsfall och kan därför användas för att uppskatta källimpedansen. I detta projekt har vi inte haft tillfälle att samla in data vid transformatorinkopplingar men vi har tidigare observerat ett antal sådana och ett exempel ges i figur 5.



Figur 5: Inrushström vid inkoppling av transformator och motsvarande spänningar. Eftersom spänningsfallet bara uppträder i ena halvperioden är det inte meningsfullt att uppskatta amplituden med DFT utan här har en annan teknik, Hilberttransform, använts.

Denna teknik baserar sig på förändring i vågform. Genom att analysera vågformen en kort tid innan kopplingen, kan man förutsäga hur vågformen kommer att fortsätta om inget händer. Skillnaden mellan denna förutsägelse och den vågform som faktiskt observerats ger en skillnadsvågform, exempel på sådana skillnadsvågformer visas i figur 6.



Figur 6: Skillnadsvågformer för spänning vid kopplingen som visas i figur 3. Kopplingen sker i denna figur vid 1.05 s, det före är brus.

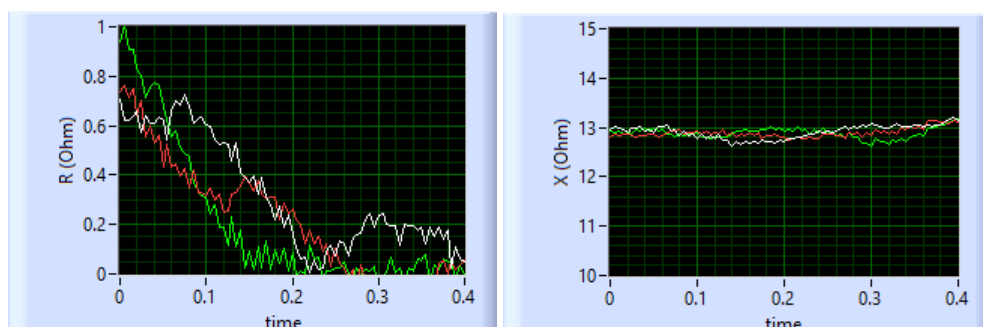
Skillnadsvågformerna kan användas för att skatta källimpedansen eftersom förändringen i spänning är kopplad till förändringen i ström genom en enkel kretsmodell som baseras på att källimpedansen kan beskrivas som en seriekoppling av en resistans med en induktans:

$$-\Delta V = R \Delta I + L \frac{d\Delta I}{dt} \quad (7)$$

Genom att anpassa ekvation 7 till de observerade skillnadsvågformerna får man skattningar på resistansen R och induktansen L som enkelt ger den komplexa källimpedansen:

$$Z = R + 2\pi j f L \quad (8)$$

På liknande sätt som för den andra komplexa metoden kan man studera resultatet som funktion av avstånd från steget som visas i figur 7. Man ser här att realdelen inte förefaller lika tillförlitligt skattad men att resultatet är konsistent med de övriga metoderna, speciellt är värdet 0.05 – 0.1 sekunder efter kopplingen ungefär detsamma. Liksom för föregående metod används variationen i Z under ca 0.5 s som en uppskattning av osäkerheten.



Figur 7: Komplex källimpedans uppskattad med vågformskillnadsmetoden för samma data som i figur 3. Jämför med figur 4.

Trots att denna metod inte verkar vara lika noggrann som de övriga har vi valt att utvärdera den i detta projekt eftersom det är den enda metoden som kan tillämpas på transformatorinkopplingar och andra händelser som ger icke-sinusformade förändringar.

2.4 ANALYSVERKTYG

I detta projekt har metoderna som beskrivs ovan förbättrats och vidareutvecklats samt byggts in i ett automatiskt analysverktyg. Detta verktyg övervakar specificerade mappar efter nyinkomna störningsfiler och när en ny störningsfil finns tillgänglig bedömer verktyget om den kan användas för uppskattning av källimpedans. I så fall utförs analys enligt alla tre metoderna och resultatet loggas till en textfil.

Detta verktyg har här använts av Svenska kraftnät för resultaten som redovisas i kapitel 4.1. Man kan tänka sig vidareutvecklingar av verktyget som att det direkt kommunicerar med övergripande informationssystem som till exempel SCADA eller andra nätövervakningssystem. I så fall kan nätoperatören bli underrättad om att en ny källimpedansmätning är tillgänglig och få resultatet inom en kort tid.

3 Insamling av mätdata

I detta kapitel diskuteras de grundläggande mätningarna, vågformsregistreringarna, som är basen för en uppskattning av källimpedansen med metoderna som beskrivits i förra kapitlet. Vågformsregistreringen initieras av en händelse, som en brytarmanöver, och sparas i en vågformsfil, typiskt i COMTRADE format. I de flesta fall kan detta hanteras av störningsskrivare som redan är installerade men andra metoder är möjliga, avsnitt 3.1 beskriver kraven på mätningar.

Olika möjligheter för att kunna genomföra de registreringar som krävs diskuteras i avsnitt 3.2.

3.1 GRUNDLÄGGANDE KRAV

Då skattnig av källimpedans innebär att en förändring i ström relateras till en spänningsförändring är det uppenbart att det måste finnas en relevant spänning till varje ström. Detta är inte alltid fallet, det finns exempel på att ingen spänning registreras i vågformsfilen från störningsskrivaren; i dessa fall är det omöjligt att uppskatta källimpedansen. I andra fall finns bara en fasspänning och då kan källimpedansen bara skattas för den fasen. I de flesta ställverk finns emellertid alla relevanta spänningar tillgängliga någonstans och det är mer en praktisk fråga att konfigurera en störningsskrivare för de nödvändiga kanalerna. Det är också ytterst rekommendabelt att registrera alla kanaler i samma störningsskrivare, visserligen *kan* det vara möjligt att synkronisera insamlingar från flera störningsskrivare med GPS-tidstämplar men detta innebär i bästa fall bara extra arbete och i sämsta fall visar det sig omöjligt att synkronisera signalerna på ett tillförlitligt vis.

För att genomföra analyserna behöver vågformer före och efter förändringen jämföras. Detta kräver att registreringen innehåller tillräckligt lång tid runt förändringen. Åtminstone en sekund av vågformer före och efter förändringen behövs.

Strömförändringen måste vara stor nog att ge en mätbar spänningsförändring på grund av källimpedansen. Typiskt innebär detta att spänningsförändringen måste vara runt en procent eller större. Om man tolkar källimpedansen som kortslutningsström, ger detta att strömförändringen behöver vara ungefär en procent av kortslutningsströmmen vilket ofta är en avsevärt stor ström.

Förändringen måste dessutom ske så snabbt att övriga förhållanden i kraftsystemet kan antas konstanta för och efter. Som illustreras i figur 2, förändras ständigt förhållandena i kraftsystemet inom ett spann på några procent. Några mer detaljerade undersökningar av kraven på snabbhet har inte gjorts men erfarenheterna från de analyserade data visar att brytarmanövrar är snabba nog. Troligtvis är det också möjligt att använda lastförändringar som sker inom ett fåtal sekunder, men några exempel på sådana är inte tillgängliga.

Sammanfattning av krav:

- Sammanhörande ström och spänningsvågformer från en och samma störningsskrivare.
- Minst en sekund vågformer före och efter förändringen.
- Strömförändringen bör vara i storleksordningen en procent av kortslutningsströmmen eller mer.
- Strömförändringen bör ske snabbare än någon sekund. Brytarmanövrar att föredra.

3.2 MÖJLIGA MÄTSCENARIOR

I detta projekt har främst inkoppling av reaktorer studerats. Detta är ett fördelaktigt scenario då huvudsakligen systemets reaktiva effekt ändras och systempåverkan och andra konsekvenser är mindre än om den aktiva effekten ändras. För att ge möjlighet till återkommande mätningar krävs att reaktorerna kopplas in och ut varje gång ett mätresultat önskas. I vissa nät, till exempel Svenska kraftnät, sker uppenbarligen sådana in och urkopplingar relativt regelbundet på dygnsbasis. I andra nät, som Ellevios nät i Stockholm, är reaktorerna konstant inkopplade och mycket få in och urkopplingar sker normalt. Möjligheten till återkommande mätresultat skiljer sig alltså väsentligt i olika nät.

Man kan tänka sig att det är möjligt att tillfälligt koppla ur och in reaktorer i liknande nät som Stockholms utan att störa systemets funktion i någon högre grad. Detta kräver dock att de tänkta manövrerna analyseras i förhand för att bedöma effekterna, samt att mätningar av källimpedans bedöms vara viktiga nog i det aktuella nätet. Med en vidareutveckling av analysverktyget, som nämns i avsnitt 2.4, kan resultatet av en beordrad mätning vara tillgängligt för nätoperatören inom någon minut beroende på hur kommunikationen mellan störningsskrivare och övriga system löses.

Ett närliggande scenario är kondensatorbankar. Sådana är dock främst placerade på lägre spänningsnivåer och en mätning där bör domineras av impedansen i transformatorn som levererar effekt till nivån. Om den reaktiva effekten är tillräcklig enligt avsnitt 3.1, kan det vara möjligt att få en användbar mätning på den högre spänningsnivån. I övrigt är kondensator- och reaktorbanks snarlika.

Inkoppling av transformatorer är en annan möjlighet. Beroende på fasläget när spänningen senast bröts, kan transformator kärnan vara permanentmagnetiserad och kommer att gå i mätning ena halvperioden under de första perioderna efter spänningen satts på igen. Detta ger upphov till en avsevärd strömrusning, illustrerad i figur 5, där toppströmmen kan vara flera gånger större än nominell ström. Denna ström kan vara nog att ge ett mätbart spänningsfall och därmed ge en uppskattning av källimpedansen, preliminära egna analyser utanför detta projekt pekar i den riktningen. Efter några perioder klingar strömrusningen av på grund av förlusterna i transformator kärnan.

För att skatta källimpedans från transformatorinrusningar krävs att vågformsmetoden i avsnitt 2.3.2 används eftersom strömrusningen inte är sinusformad med 50 Hz. Därför kan DFT-baserade metoder inte användas.

Det finns kraftkonsumenter som naturligt åstadkommer stora lastförändringar. Ett intressant exempel på detta är stålverk med ljusbågsugnar, vid besök har det noterats att effekten kan pendla mellan 0 och 150 MVA på mycket kort tid. Några detaljerade registreringar av effektförhållandena under smältprocessen finns dock inte tillgängliga för författarna så undersökningar krävs för att bedöma vilka möjligheter som finns. Samma sak gäller andra industritillämpningar med stora kraftbehov. För att ytterligare komplicera situationen är sådana industrikunder ofta utrustade med en FACTS anläggning för att minska påverkan på nätet och det är oklart hur styrningen i FACTS påverkar möjligheterna till en bedömning av källimpedansen. Sammanfattningsvis kan det vara möjligt, men kräver speciella undersökningar, att industrikunder kan användas för skattning av källimpedans.

En erfarenhet från detta projekt är att det inte är möjligt att skatta källimpedans genom att flytta last från en ledning till en annan. Eftersom totala lasten i systemet är densamma, påverkas ju inte generatorerna. Den eventuella spänningsändring som kan observeras vid en lastomflyttning kommer enbart från de ledningsdelar som fått ändrad last.

4 Resultat

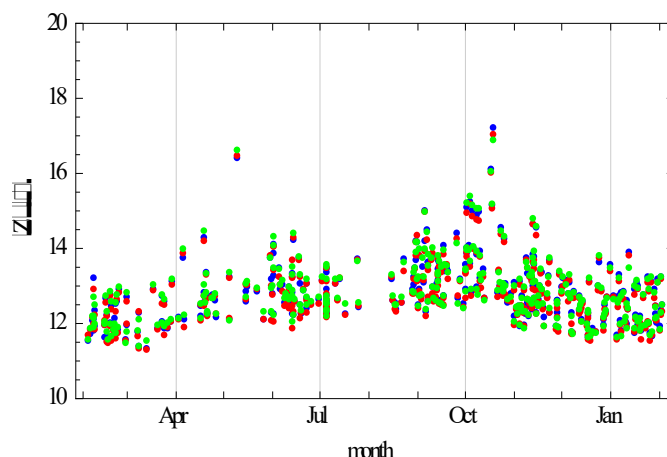
I detta kapitel redovisas den analys av mätdata som har gjorts inom projektet. Dels har Svenska kraftnät analyserat en stor mängd kopplingar från två olika ställen i stamnätet och dels har registreringar från prov av en reaktor hos Ellevio samlats in och analyserats.

4.1 DATA FRÅN SVENSKA KRAFTNÄT

För att uppskatta kortslutningseffekten i två 400 kV stationer har en större mängd mätdata från störningsskrivare till reaktorbrytare studerats. För analysen har analysverktyget som beskrivs i avsnitt 2.4 använts med standardinställningar för ström och spänningstriggers. Båda stationerna utgör en viktig roll i stamnätets funktion där station 5 även är geografiskt närliggande till en större kraftproducent.

4.1.1 Station 3

För station 3 har mätdata från 372 förväntade reaktorkopplingar registrerats under ett år. Detta resulterade i 340 estimeringar av källimpedansen i stationen. Att inte estimeringar har kunnat göras på samtliga data beror på att störningsskrivare i vissa fall har triggat för andra typer av händelser än manövrering av reaktorn. Störningsskrivaren i denna station har samtliga fasspänningar och därför kan oberoende uppskattningar för varje fas göras. Resultaten för faserna visas med olika färg i figur 8 och man ser att de 3 fasernas resultat avviker mycket lite från varandra.

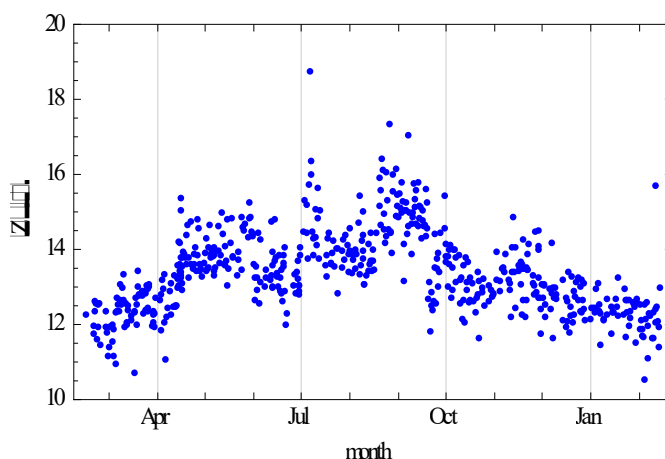


Figur 8: Uppskattning av källimpedans för 340 in och urkopplingar i Station 3. Här finns spänningar för alla 3 faserna tillgängliga och uppskattningar från de olika faserna visas med olika färg. Värderna från den enkla metoden i avsnitt 2.2 presenteras i figuren.

Resultaten visar på en svag årstidsvariation i estimerat värde. De två tydligt avvikande estimeringarna i maj och oktober sammanfaller väl med avbrott på ledningar i Station 3.

4.1.2 Station 5

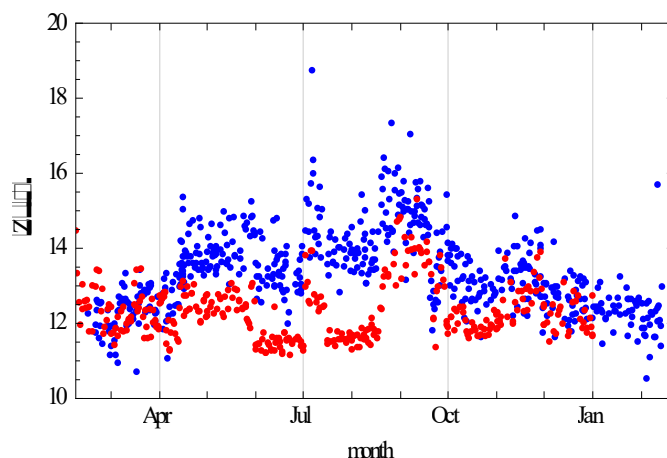
För station 5 har mätdata från 586 förväntade reaktorkopplingar registrerats under ett år. Detta resulterade i 586 estimeringar av källimpedansen. I denna station finns bara spänningar för fas 2 tillgängliga för störningsskrivaren och därför kan bara denna fas användas för källimpedansuppskattningarna som redovisas i figur 9.



Figur 9: Uppskattning av källimpedans för 586 in och urkopplingar i Station 5. Här finns bara spänning för fas 2 tillgänglig. Värden från den enkla metoden i avsnitt 2.2 presenteras i figuren.

Station 5 visar på en tydligare årstidsvariation och en något mindre spridning i resultatet. En viss årstidsvariation kan logiskt förklaras av att mindre produktion är i drift under den varma delen av året samt att underhåll i stationer/ledningar som ger upphov till avbrott i nätet förekommer mer regelbundet.

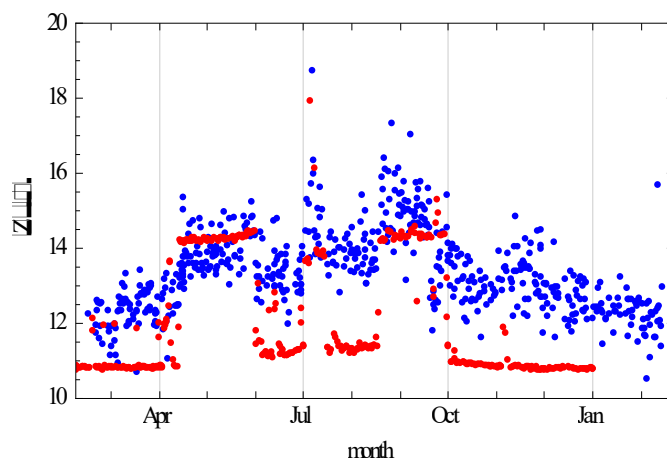
För att verifiera resultatens riktighet gjordes en jämförelse mellan uppskattningarna från den enkla metoden i avsnitt 2.2 och estimat från Svenska kraftnäts SCADA-system. Estimaterna är tagna för ungefär samma tidsintervall men tidpunkt på dygnet varierar något. För att beräkna kortslutningseffekten användes programmet PSS/e. Ett första försök gjordes att beräkna korslutningsimpedans med hjälp av programmets felströmsmodul. Det visade sig dock att estimaten inte innehöll någon felströms-data för maskiner utan endast replikerade värden i form av maskinernas synkronreaktanser. Dessa är normalt mycket större än den transienta reaktansen och kommer därför ge upphov till en lägre kortslutningseffekt. Detta var också något som observerades i resultaten från försöken vilka gav impedanser som var 4-6 Ohm högre än de från mätningarna. Då felströmsdata i dagsläget inte går att överföra till estimat i PSS/e övergavs denna metod och ett nytt försök gjordes att med hjälp av den vanliga loadflow-delen i programmet göra en grovare jämförelse. Denna övning gick ut på att precis som vid den verkliga mätningen beräkna förhållandet mellan förändringar i ström och spänning vid in/ur-koppling av reaktorn. Detta gjordes för samtliga estimat och resulterade i värden som överensstämde relativt väl med mätresultaten.



Figur 10: Mätresultat från figur 9 i blått jämförda med PSS/e estimat i rött. Estimaten och mätningarna är inte för exakt samma tider vilket kan förklara skillnader för vissa utläggare.

En skillnad man ser är att spridningen är lite mindre i resultaten från PSS/e men av samma storleksordning. En del av den observerade spridningen i mätresultaten beror alltså på yttre faktorer. Man kan även notera att årstidsvariationen i utmärker sig lika tydligt vilket ger ett något lägre resultat i mitten på året. I övrigt är resultaten i samma storleksordning och följer varandra väl. Viktigt att notera är dock att vid den här typen av loadflow beräkning hålls spänningen konstant i reglerande noder för att åstadkomma spänningsreglering och generatorer modelleras alltså inte som en emk bakom en impedans. Analys av spänningsvågformer från störningsskrivarna visar dock inga tecken på att någon spänningsreglering hinner äga rum vilket påverkar jämförelsen i någon grad.

För att studera den närliggande produktionens inverkan på kortslutningsimpedansen i Station 5 så plottades total produktion i samma graf som mätresultaten. Produktionen kunde enkelt tas fram med hjälp av de tidigare använda estimaten i PSS/e. I figur 11 visas, av pedagogiska skäl, den totala produktionen inverterad eftersom mindre produktion betyder större källimpedans. Produktionsvärdena är också skalade och förflyttade för att anpassas till figurens skala.



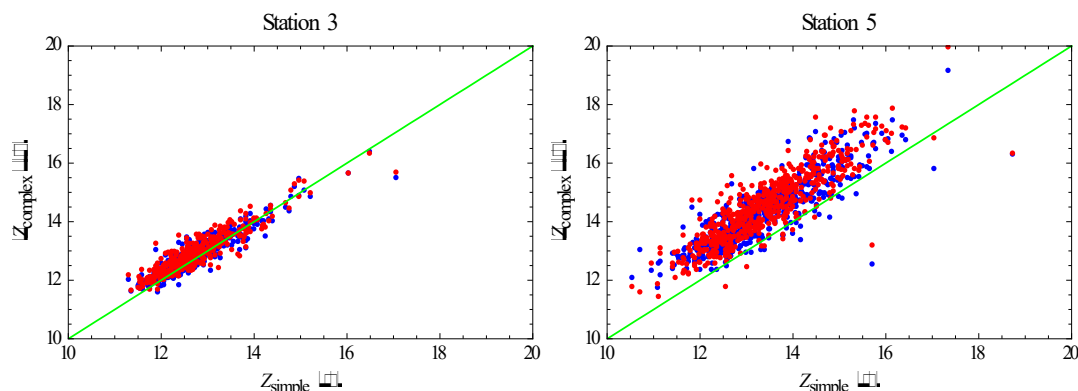
Figur 11: Samma mätresultat som i figur 9 och 10 men här är en indikator, se text, på totala produktionen i nätet plottad i rött.

Man kan här finna en korrelation mellan produktionen och kortslutningsimpedansen, samt förklaring till vissa avvikande värden.

4.1.3 Analys av de tre metoderna

De resultat som presenterats ovan för station 3 och 5 är alla från den enkla uppskattningsmetoden som beskrivs i avsnitt 2.2. Ofta är en sådan uppskattning av källimpedansens belopp uppenbarligen tillfyllest då källimpedansen huvudsakligen är induktiv. Den resistiva delen kan emellertid bli viktig i vissa studier och då behövs de mer komplicerade metoderna som beskrivs i avsnitt 2.3. Om transformatorinrusningar skall användas för källimpedansuppskattningar kan dessutom endast vågformsmetoden användas.

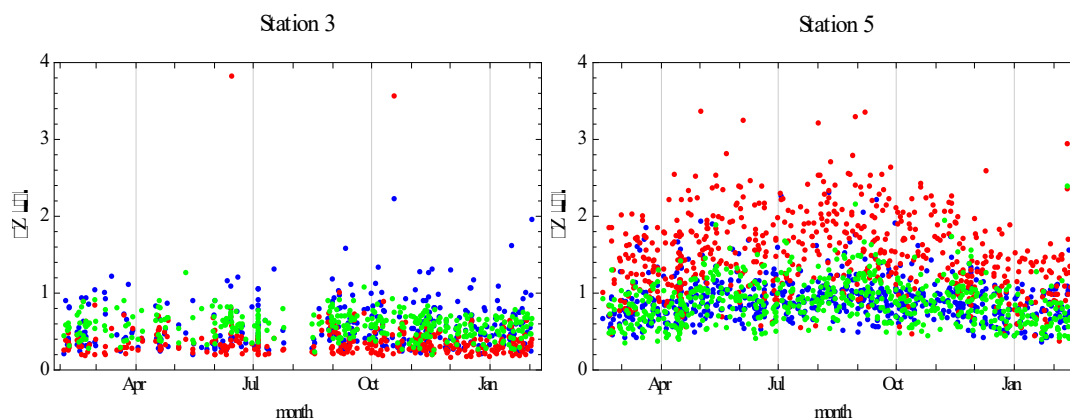
Då analysverktyget använder och loggar resultat från alla tre metoderna är det lämpligt att här jämföra resultaten för att utvärdera deras tillförlitlighet. Beloppet av den komplexa källimpedansen skattad med de mer komplicerade metoderna är i figur 12 plottad mot resultatet från den enkla metoden. Det framgår att metoderna ger i stort sett samma resultat men de komplexa värdena för station 5 har cirka 1Ω högre värde än den enkla i medeltal. För station 3 ger alla metoderna samma belopp i medeltal. I figuren syns ingen anmärkningsvärd skillnad mellan de två komplexa metoderna, till och med de avvikande värden som finns är gemensamma för båda.



Figur 12: Jämförelse mellan den enkla metodens resultat och beloppet av resultatet från de två komplexa metoderna. Metoden med amplitud och fasestatist, avsnitt 2.3.1, visas i blått och vågformsmetoden, avsnitt 2.3.2, i rött. Den gröna linjen indikerar var identiska värden skall ligga.

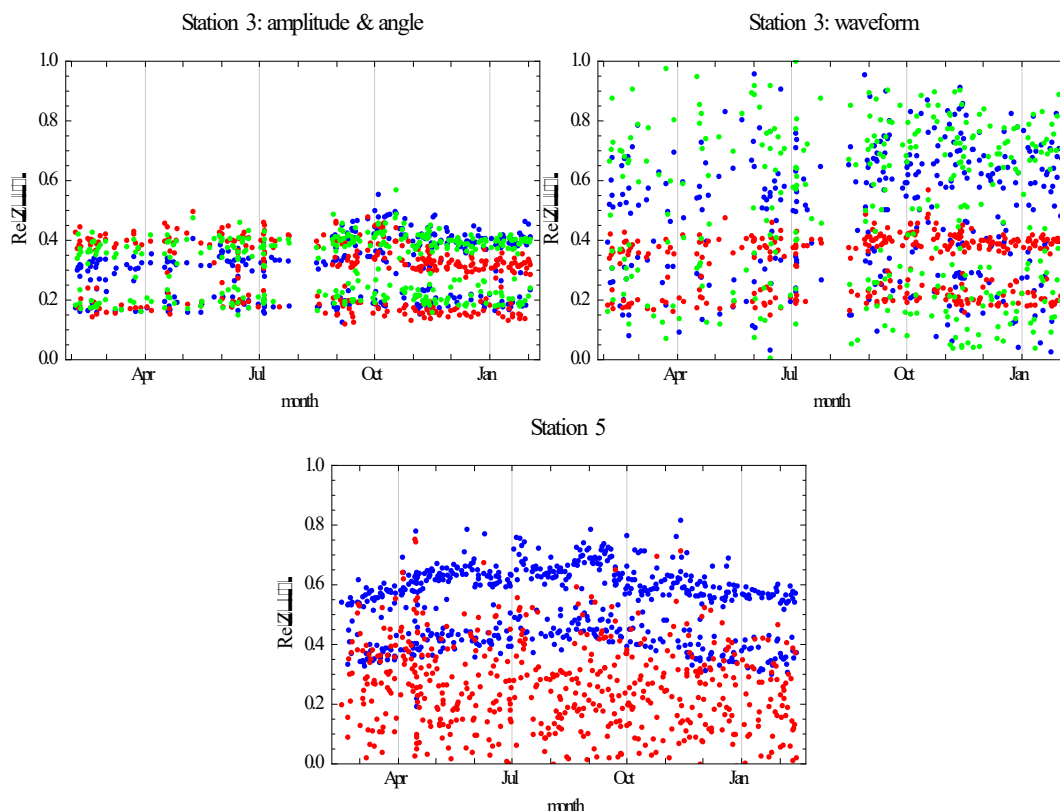
Ur figur 12 kan man alltså dra slutsatsen att alla tre metoderna ger ganska likvärdiga resultat för källimpedansens belopp. Data från de två stationerna verkar skilja sig något av okänd anledning.

Ett viktigt resultat från analysen enligt alla tre metoderna är osäkerhetsuppskattningarna, figur 13 visar dessa. Som förväntat från ovanstående figurer indikerar osäkerhetsuppskattningarna en noggrannhet på 1 – 2 Ω och är alltså relativt realistiska. Också här ger station 5 ett något sämre resultat men någon närmare analys varför har inte kunnat göras. Det är också intressant att notera att skillnaden mellan mätuppskattningar och beräkningar är av samma storleksordning eller mindre än osäkerhetsuppskattningen.



Figur 13: Osäkerhetsuppskattningar för de tre olika metoderna. Den enkla metoden visas i blått, amplitud och fas metoden i rött samt vågformsmetoden i grönt.

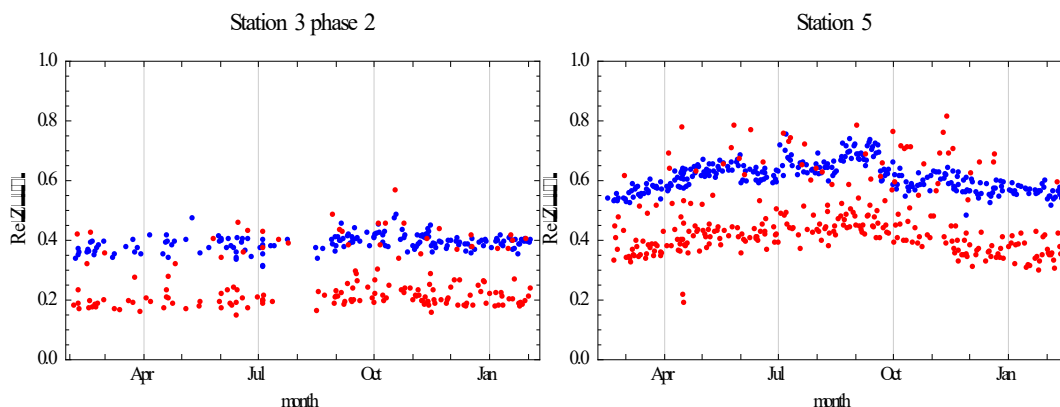
Slutligen kan det vara intressant att studera realdelen av den skattade källimpedansen i de båda stationerna som visas i figur 14.



Figur 14: Källimpedansens realdel. För station 3 visas resultatet för de tre faserna och därför krävs separata plottar för de två metoderna. För station 5 är amplitud och fasmetoden plottad i blått och vågformsmetoden i rött.

Man ser först att den induktiva delen av källimpedansen klart dominerar som väntat. Källresistansen verkar vara ungefär 0.5Ω . Vidare visar vågformsmetoden klart större spridning i resultatet, något som också framkom vid presentationen av den i avsnitt 2.3.2.

Det förefaller märkligt att realdelarna verkar uppträda i två band för båda stationerna med en markant skillnad emellan. Om man separerar in- och urkopplingar som i figur 15 kan man finna att vid inkopplingar skattas realdelen oftast, men inte alltid, något lägre än vid fränkopplingar. Orsaken till detta fenomen är svårt att uttala sig om; det kan vara någon detalj i analysen som åstadkommer detta men det kan kanske också vara en verklig effekt. Effekten är mycket liten och därför svåranalyserad, dock tydlig i dessa data.

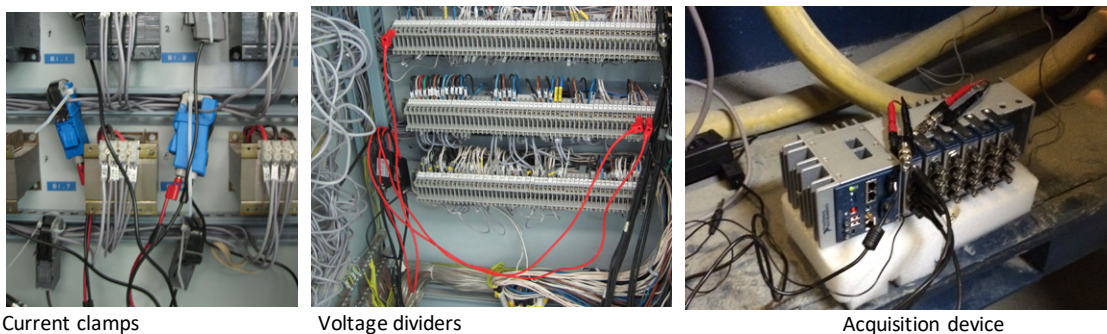


Figur 15: Snarlik figur 14 men här plottas inkopplingar av reaktorn i rött och fränkopplingar i blått. För station 3 visas endast en fas.

4.2 DATA FRÅN ELLEVIO

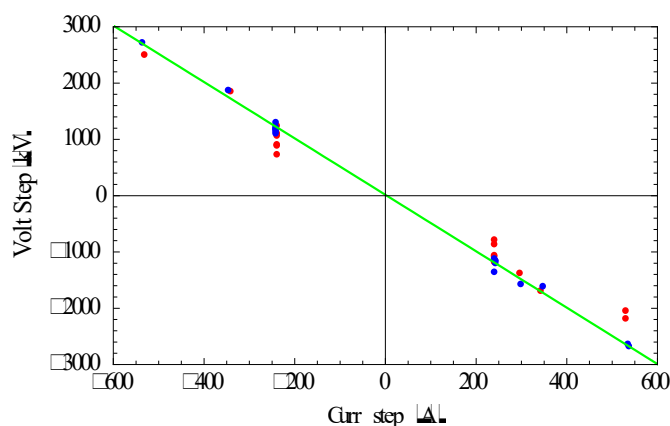
I Ellevios Stockholmsnät finns reaktorer men de är för det mesta ständigt inkopplade. Ett tillfälle till att få vågformsregistreringar som kan användas för skattning av källimpedans gavs då en reaktorbank skulle provas vid olika reaktiv effekt. Dessa reaktorer var nämligen utrustade med lindningskopplare för att kunna reglera reaktiva effekten.

Dessa registreringar gjordes dels med en störningsskrivare i det befintliga skyddet, där brytarsignalen triggade insamlingen. Dels, som komplement och för att endast en spänningsfas var tillgänglig i skyddet, med tillfällig laborieutrustning, figur 16, som kopplades in på sekundärkretsarna av spännings och strömtransformatorerna. 17 brytaroperationer registrerades av båda systemen vid olika lindningskopplarlägen som ger olika reaktiv ström. Detta fall är därmed intressant eftersom man kan studera inverkan av strömstegets storlek på resultatet.



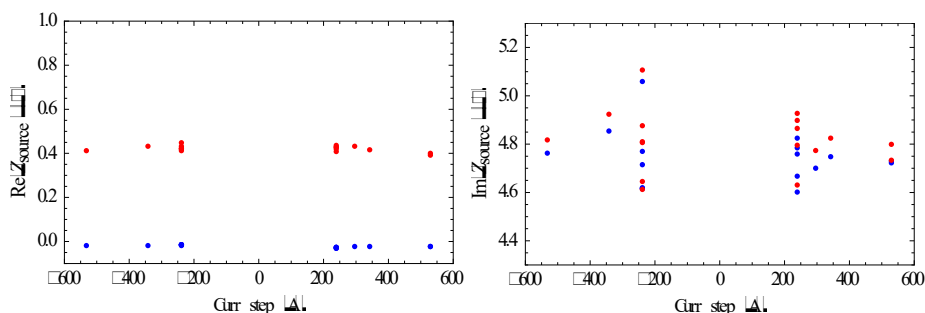
Figur 16: Laborieutrustning för registrering under reaktorprovning.

Eftersom strömstegets storlek varierar, är det lämpligt att använda det som parameter i figurerna. Om man dessutom plottar spänningssteget mot strömsteget som i figur 17 kan man få en annan, kanske mer intuitiv, bild av källimpedans. Man ser här tydligt effekterna av ekvation 2, nämligen att spänningssteget har omvänt tecken mot strömsteget och att de är proportionella mot varandra. En passning av störningsskrivardata ger en skattad impedans på 5.0Ω , indikerat av den gröna linjen.



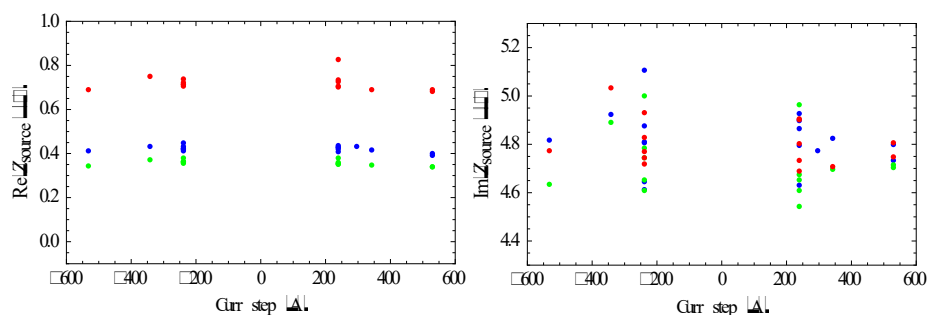
Figur 17: Observerat spänningssteg som funktion av strömsteg vid reaktorprovning. Den gröna linjen indikerar en källimpedans på 5.0 Ω . Resultat från störningsskrivare i blått, från laboratorieutrustning i rött.

I mer detalj visar figur 18 real och imaginärdelen skattad med amplitud och fasmetoden från både störningsskrivare och laboratorieutrustning för fas 2. Man ser att båda registreringsmetoderna ger ungefär samma värde på reaktiva delen medan de skiljer sig något i den resistiva. Det framgår också att kopplingar med litet strömsteg ger stor variation i de skattade värdena beroende på att spänningssteget är svårt att uppskatta med noggrannhet. Det är denna och liknade observationer som givit upphov till tumregeln att det krävs cirka 1 % spänningssteg för att kunna uppskatta källimpedansen.



Figur 18: Real- (vänster) och imaginärdel (höger) av skattad komplex källimpedans från störningsskrivare i blått, från laboratorieutrustning i rött.

Från laboratorieutrustningens registreringar kan vi jämföra de tre faserna som i figur 19. Återigen ser vi att realdelen är större än den som är skattad med störningsskrivardata medan imaginärdelen är ungefär densamma. En viktig skillnad är de sekundära givare som används för laboratorieutrustningen, de tillför extra fel. Speciellt är det känsligt hur strömtängerna anbringas, en förskjutning av ledaren i gapet kan ändra speciellt fasen märkbart. Störningsskrivarens registreringar har ju inte detta extra fel utan endast de avvikelser som finns i de primära spännings- och strömtransformatorerna. Detta exempel visar således att det är möjligt att använda tillfällig utrustning för dessa registreringar men att resultatet kan bli något, men inte väsentligt, sämre än med en fast installerad störningsskrivare.



Figur 19: Real och imaginär del av källimpedansen för alla tre faserna från registreringar med laborieutrustning.

Efter liknande problem med att använda rätt generatorimpedans som Svenska kraftnät beskriver i föregående avsnitt, kom Ellevio fram till att en källimpedans på cirka 6Ω var att förvänta vid mättillfället. Detta värde avviker då ungefär 20 % från det mätta, vilket är i samma storleksordning som observerats av Svenska kraftnät i figur 10 ovan.

Ett annat försök att skatta källimpedans vid omflyttning av last från en ledning till en annan gav oss den viktiga erfarenheten som nämns i avsnitt 3.2. Det är nämligen viktigt att systemets **totala** last ändras för att kunna se den totala källimpedansen. Annars ser man bara impedansen av linjen som fått lasten ändrad om den är möjlig att se.

5 Slutsatser

I detta projekt har vi visat att det är möjligt att bedöma kraftsystemets källimpedans från vågformsregistreringar vid tillräckligt stora och snabba laständringar. Laständringen måste vara så stor att en mätbar spänningsförändring kan observeras, ofta betyder detta att spänningen skall ändras minst en procent. Dessutom måste laständringen vara så snabb att regleringsfunktioner inte hinner reagera, alternativt måste laständringen vara så liten att den ligger inom regulatorernas dödband. Här har in- och urkoppling av shuntreaktorer använts som laständring men andra möjligheter finns, som diskuterats i kapitel 3.

Tre olika analysmetoder har använts i studierna och de ger konsistenta resultat. Detta är en viktig indikator på att samtliga metoder är användbara och tillförlitliga. Jämförelsen med beräknad källimpedans ger också ökad trovärdighet till analysen då något exakt svar inte finns. Det kan noteras att avvikelsen mellan beräknad och uppmätt källimpedans är som mest i samma storleksordning som osäkerhetsuppskanningen ifrån mätningen.

Under projektets gång har ett analysverktyg för källimpedansuppskattningar utvecklats och installerats hos Svenska kraftnät. Detta gjorde det möjligt för Svenska kraftnät att genomföra de omfattande analyser som redovisas i kapitel 4. I en framtid kan man tänka sig att utveckla detta verktyg för att direkt informera operatören om aktuell källimpedans så snart en relevant händelse observerats i nätet. Denna möjlighet blir intressant i den framtida utveckling som Svenska kraftnät beskriver nedan. Övriga nätägare i Sverige är beroende av kvaliteten på Svenska kraftnäts uppskattningar för att fatta riktiga beslut om sitt eget nät om de inte gör egna mätningar. Som framgår av Ellevios synpunkter nedan är situationen så ansträngd i storstadsområden att speciella åtgärder krävs.

5.1 SVENSKA KRAFTNÄTS SYNPUNKTER

Nätkoder som trätt i kraft ställer vissa krav på systemansvarig för överföringssystem dvs. Svenska kraftnät i Sverige. I avseenden kring spänningsreglering, skyddsinställningar, klassisk HVDC-överföring och kortslutningsström kan information om källimpedansen vara till nytta för Svenska kraftnät. Genom att beräkna och övervaka källimpedansen utifrån kopplingar som ändå sker i systemet kan data om källimpedansen samlas in. Ett flertal mätare finns redan installerade ute i nätet och fler kommer att installeras. Deras huvudsyfte är dock inte att samla in mätdata för beräkning av källimpedansen utan ofta för övervakning av skick och funktion av olika komponenter i nätet. Däremot då mätdata ändå samlas in kan den även nyttjas för beräkning av källimpedans. För vissa typer av mätare som finns installerade i nätet visade det sig att mätdata behöver anpassas eller förbehandlas för att vara på ett visst format med avseende på tidssamplingen i källimpedansberäkningen. Det pågår en diskussion med leverantören av mätare för att se hur man på enklast sätt kan anpassa mätdata.

Vidare, i ett första skede är källimpedansdata först och främst intressant utifrån trender över året och olika driftläggningar. På sikt, när kärnkraftreaktorer stängs

ner och/eller i samband med revision, kan information om källimpedansen få en större betydelse för planeringen av driften och i driftskedet. Även om dynamiska modeller för systemet finns och att sådana modeller kan anpassas till rådande planerings- och driftförutsättningar görs inte det idag för felströmsnätet. Beräkning av källimpedans utifrån mätdata ger därför kompletterande information. Anpassning av felströmsnätet och jämförelse av källimpedansberäkningen möjliggör verifiering av nätmodellen.

5.2 SYNPKTER FRÅN ELLEVIO

I Stockholm är källimpedansen låg ända ner på fördelningsstationsnivå som i vissa fall transformerar från 220 kV ner till 11 kV. Med så låg källimpedans ställs det höga krav på anläggningarna för att kunna hantera de kortslutningseffekter som kan uppstå.

Vid vissa fall och anläggningar blir effekterna så stora att sektionering behövs för att hålla nere kortslutningseffekten. Påverkan blir då istället en lägre tillgänglighet och en risk för längre avbrottstider.

Med en tillförlitlig mätmetod kan beräkningsmodeller och antagna värden verifieras och ge ett säkrare underlag för valet av nätets driftläggning.

Det finns även en nytta med att från kontroll- och mätutrustning få verkliga värden på källimpedansen vid omläggningar och olika driftlägen för att kunna justera inställningar vid behov. Detta ger även viktiga data om hur nätet varit uppbyggt vid händelser eller störningar. I ett långsiktigt perspektiv så kan även mätningen av källimpedansen vara ett verktyg för dynamiska inställningar och funktioner.

MÄTNING AV KÄLLIMPEDANS

Källimpedansen är en viktig faktor vid dimensionering och drift av kraftnät. Källimpedansen påverkar inte bara valet av brytare utan också skyddsinställningar och operatörens beslut vid driftomläggningar.

Här beskrivs hur in- och urkopplingar av shuntreaktorer kan användas för att bedöma källimpedansen. Ett relativt stort mätunderlag från Svenska kraftnät indikerar att uppskattningar från mätdata är konsistenta med beräkningar och av ungefär samma kvalitet.

Rapporten beskriver översiktligt några olika metoder för att bedöma källimpedansen från vågformsregistreringar vid reaktorkopplingar och diskuterar också vilka krav som ställs för att kunna uppskatta källimpedansen från liknande mätdata.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk