

2012-03-30

Dnr: 2011/805

Skydd mot geomagnetiska stormar

Elektromagnetisk påverkan på kraftsystemet

Extern version

Förord

Denna rapport utgör slutrapport på uppdrag 2011/805 "Skydd mot magnetstormar m.m." som Gd beslutade 2011-06-10.

Rapporten är framtagen av en arbetsgrupp.

Studier av elektromagnetiska hot mot stamnätet har utförts tidigare. Denna rapport fokuserar på elektromagnetiska fenomen i kraftsystemet som uppkommer p.g.a. solens aktivitet, främst jordmagnetiska strömmar, GIC, och störningar av GPS-signaler.

Innehåll

Sammanfattning	7
1. Bakgrund	9
1.1 Störningar i svenska stamnätet.....	9
1.2 Störningar i svenska regionnätet.....	10
1.3 Störningen i Québec 1989.....	11
1.4 Carrington händelsen.....	12
1.5 Tidigare och pågående studier	12
2. Påverkan på kraftsystemet.....	14
2.1 Geofysiska grundfakta	14
2.2 Störningar i telekommunikationer.....	15
2.3 Obefogade utlösningar	15
2.4 Spänningsinstabilitet.....	17
2.5 Transformatorskador.....	17
3. Gradering av geomagnetiska stormar	19
4. Den typiska GIC-störningen	21
5. Vad har andra gjort?	23
6. Av SvK redan vidtagna tekniska åtgärder	24
7. Av SvK vidtagna driftåtgärder	26
8. Sverige i förhållande till omvärlden	27

9. Pågående studier	28
10. Möjliga studier	29
11. Möjliga tekniska åtgärder	32
12. Möjliga driftåtgärder	33
13. Övriga möjliga åtgärder	34
14. Slutsatser	35
15. Mer information	38
Referenser	39
Appendix 1	42

Sammanfattning

Det svenska kraftsystemet har påverkats och kommer att påverkas av solens aktivitet. Kraftsystemet har förmåga att upprätthålla driften vid solstormar av den magnitud som drabbat Sverige under de senaste 60 åren. Vad gäller påverkan på kraftsystemet är det inte relevant att gå längre tillbaka i historien än så p.g.a. att dagens elkraftsystem inte kan jämföras med utformningen av äldre tiders elförsörjning. Däremot är historiskt inträffade solstormar av intresse för att kunna få en uppfattning om hur kraftiga solstormar kan bli.

Kraftsystemets förmåga att motstå geomagnetiska störningar har under årtionden successivt förbättrats. Sedan 80-talet har reläskyddssystemens utföranden förändrats för att minska risken för felaktig bortkoppling av anläggningsdelar i samband med geomagnetiska störningar. Transformatorbeståndet har successivt bytts ut så att i dagsläget är 67% av alla stamnätsanslutna transformatorer konstruerade enligt den utformning som är mest tålig mot geomagnetisk inducerad ström. Branschgemensamma system- och komponentstudier har bedrivits och dokumenterats i rapporter. Instruktioner till kontrollrum för hur dom skall agera i samband med geomagnetisk storm har under årtionden modifierats och förbättrats. Trots ovan nämnda insatser har arbetsgruppen funnit att det finns några enskilda insatser som kan vara påkallade enligt nedan.

Arbetsgruppen rekommenderar följande åtgärder, utan inbördes rangordning:

1. Omedelbart utreda vilka principer som skall tillämpas för att distribuera tid och takt i SvK:s stationer. Någon företagsövergripande riktlinje eller policy har ej gått att finna på detta område. Införandet av IEC 61850 kan medföra än mer ökat behov av att SvK har en väl genomtänkt och redundant struktur för angivelse av tid och takt.
2. Ställa GIC relaterade krav, enligt SvK:s egen standardnivå, på alla stamnätsanslutna utrustningar genom tvingande skrivningar i anslutnings- och anläggningsavtal.
3. Ställa krav vid upphandling av reläskydd till stamnätet vad gäller uppträdande för 3:e-, 6:e- och 9:e-ton.
4. Införa eget mätsystem för GIC vid minst en utvald transformator i syfte att användas som egen verifiering av pågående GIC.

5. Utredda vilken tålighet SvK:s shuntkondensatorer har mot GIC.

I enlighet med uppdraget har även följande aktiviteter genomförts eller planerats:

- Information på SvK:s hemsida gällande solstormar har uppdaterats.
- Utbildningsinsats vad avser reläskyddskunskap genomfördes december 2011.
- Utbildningsinsats för driftavdelningen planeras att genomföras i samband med ikraftträdande av ny driftinstruktion D-141.
- Kontakt etablerad med Institutet för rymdfysik i Lund avseende förvarningssystem.

1. Bakgrund

Aktiviteter inne i solen kan i vissa fall ge störningar i elkraftsystem på jorden. Solaktiviteter som leder till ett utbrott på solen kan beskrivas i tre faser vad gäller påverkan på jorden. Ett utbrott på solen kan först orsaka strålning som når jorden efter samma gångtid som för solljuset, d.v.s. 8 minuter. Denna strålning är främst röntgen- och UV-strålning. Något senare, 15 till 60 minuter efter utbrottet, så träffas jorden av energirika partiklar, protonskurar. Efter en till tre dygn (kan som snabbast vara 15 timmar) träffas jorden av, en eller flera, koronamassutkastningar. Den består av gaser innehållande magnetfält från stora strömmar av elektroner. I denna rapport behandlas den påverkan koronamassutkastningar har på det svenska elsystemet, främst stamnätet.

En koronamassutkastning kan ge upphov till förändringar i jordens magnetfält som i sin tur ger förändringar i de strömmar som går i jonosfären (miljontals ampere). Det ger i sin tur spänningsskillnader mellan olika platser på jorden. Dessa spänningsskillnader ger upphov till strömmar. Strömmen går i jordskorpan men kan också gå genom ledande föremål som är jordade på olika ställen, exempelvis direktjordade kraftsystem, teleledningar samt olje- och gasledningar. Dessa strömmar kallas på engelska Geomagnetically Induced Currents, GIC, och på svenska jordmagnetiskt inducerade strömmar. I denna rapport kommer förkortning GIC att användas.

Risken för GIC hänger ihop med solens aktivitet, den s.k. solfläckscykeln. Den varierar över en period på 9 till 13 år, man brukar ange 11 år som medelvärde. Solfläckscykeln är helt enkelt hur antalet solfläckar varierar över tiden. Förra solfläcksmaximum var år 2000 och nästa topp beräknas till 2013. Risken för GIC är svagt kopplad till solfläcksaktiviteten. Till exempel var år 2003 ett år med GIC aktivitet. Historiskt verkar risken för GIC vara som störst cirka 2-3 år efter solfläcksmaximum.

1.1 Störningar i svenska stamnätet

1958-02-11: 02.58 – 04.07

löste fyra transformatorer via differentialskyddsfunktion och sju 220 kV ledningar via jordfelsskyddets tredje steg [1]. Totalt 29 brytarfränslag med koncentration till mellersta Norrland men även ned till Nässjö.

1960-11-13: 07.29 – 13.10

löste 220 kV ledningar 22 gånger varav 20 från jordfelskyddens tredje steg [1].
Drabbat område var södra och mellersta Norrland.

1972-08-04 – 05

En transformator och en 400 kV ledning löser. Omfattande störningar i nordamerikanska nät [1].

1982-07-14: 01.54 – 02.02

löste tre 400 kV ledningar och tre 220 kV ledningar [2]. Först klockan 03.26 hade man lyckats koppla in ledningarna igen. Tidigare försök hade misslyckats. Synkronkompensatorn i Kolbotten löste också. I Magnus Wiks doktorsavhandling [3] uppges det geoelektriska fältet till 3 – 6 V/km och maximal flödesförändring till 2500 nT/min.

1991-03-24:

löste nio 220 kV ledningar och en transformator i Sverige.

2000-04-06 – 2000-04-07:

observerades den högsta GIC någonsin i ett kraftverk. Det skedde i generatortransformator T2 i Oskarshamn och strömmen mättes till nästan 300 A enligt [3].

2003-10-29: 07.11 – 07.46

en 400 kV och en 220 kV ledning löser i Blekinge respektive Härjedalen [4]. Dessutom har transformator T2 i Oskarshamn onormalt hög temperatur. Magnetfältsförändringen uppges i [3] till cirka 500 nT/min.

2003-10-30: 20.55 – 21.03

två 400 kV transformatorer i Östersund respektive Örebro löser ut [4]. I [3] uppges det geoelektriska fältet till 2 V/km och magnetfältsförändringen till 400 nT/min med en total avvikelse på cirka 2000 nT från normala lugna värden.

2003-11-20: 18.05

löste en 400 kV stamnätsledning i Blekinge [4].

1.2 Störningar i svenska regionnätet

1960-11-13:

löste sju stycken 130 kV ledningar i södra Sverige [1].

1982-07-14: 01.54 – 02.30

13 juli löste nio 130 kV ledningar [2]. Fyra transformatorer till SJ:s banmatning löste också. Konsumtionsbortfall i Malmö (20 MW i 13 minuter) och Gusum (20 MW).

1989-03-13 – 1989-03-14:

I norra Europa observerades geomagnetisk stormaktivitet som var fem gånger så stor som den som orsakade Hydro Quebec kollapsen (se nedan). Fem 130 kV ledningar löste ut i Sverige.

1989-09-19:

sju 130 kV ledningar löser ut.

2003-10-29: 07:12

en 130 kV ledning i Östergötland löser.

2003-10-30: 21.03 – 21.08

en 130 kV transformator i Norrköping och tre 130 kV ledningar (Malmö, Örebro och Boden) löser varav ledningen i Malmö orsakar att 50000 kunder blev utan ström i 20-50 minuter [4].

1.3 Störningen i Québec 1989

Den i modern tid enskilt största GIC störningen i ett elkraftsystem uppstod i Kanada i mars 1989. Nedan återges de, för denna utredning, mest intressanta fakta och slutsatser som framkom efter denna störning.

Den 10 mars 1989 fick solen ett utbrott som slungade laddade partiklar mot jorden. Den 12 mars började spänningen i Hydro-Québecs transmissionsnät att variera. Kontrollrummet vidtog åtgärder för att försöka stabilisera spänningen i systemet. Den 13 mars kl. 02.44 började reläskydd i transmissionssystemet att ge utlösningar. Inom en minut löste sju SVC-anläggningar i 735 kV systemet ut. Åtta sekunder efter sista SVC-anläggningen löst ut så löste en 735 kV ledning. Efter att den ledningen löst ut så löste ytterligare fyra 735 kV ledningar inom en sekund. Systemet var därmed splittrat och kollapsade 24 sekunder senare. Efter nio timmar återstod fortfarande 17 % av lasten att koppla in. Själva GIC störningen verkar ha varit över på sex minuter. Den electrojetström som orsakade GIC:n rörde sig från östra Kanada till Alaska på åtta minuter, d.v.s. > 1000 km/min.

I Quebec var den maximala förändringen i magnetfältet ca 400 nT/min. Stormens maximum uppmättes över norra Minnesota till 865 nT/min.

Efter störningen vidtog Hydro-Québec följande åtgärder och, enligt dem själva, med följande resultat [5]:

- Uppjustering av reläskyddens nivåer för utlösning. Effektiv åtgärd.
- Etablerat ett realtidssystem för GIC mätningar i transmissionsnätet.

- Förändring av driftinstruktioner. Vid en störning så sänks alla överföringsnivåer på AC och DC-förbindelser. Alla planerade omkopplingar i nätet senareläggs.
- Installationer av seriekompenseringar. Detta har varit en mycket lyckad åtgärd.

Som förvarning använder Hydro-Québec information från det kanadensiska regionala varningscentrumet i Ottawa <http://www.spaceweather.gc.ca/index-eng.php>. Regionala varningscentra utnämns av The International Space Environment Service (ISES). Institutet för rymdfysik (IRF) i Lund är utnämnt som vårt regionala varningscentrum.

1.4 Carrington händelsen

Richard Carrington var en framstående brittisk solastronom under 1800-talets senare hälft [6]. Torsdagen den 1 september 1859, klockan 11.18 observerade han en enorm anhopning av solfläckar som plötsligt övergick i ett bländande vitt ljus. Strax före skymning den dagen observerades norrsken över hela jorden så starka att man kunde läsa tidningen såsom i dagsljus. Telegrafsystem brände sönder telegrafpapperet och telegrafsystem fungerade trots att man kopplat bort batterierna.

Det Carrington såg var en s.k. "solar flare" som i och med denna observation blev ett nytt begrepp.

Händelsen på solen orsakade även en koronamassutkastning som träffade jorden morgonen efter med en kraftig geomagnetisk storm som följde. Styrkan på denna solstorm uppskattas idag vara av en storleksordning som förväntas ske vart 500:e år.

I dagsläget spekuleras det i vad en ny händelse av denna storleksordning skulle medföra för konsekvenser för dagens samhälle. Den första osäkerheten består i att bedöma hur stark denna händelse var, uttryckt som någon mätbar storhet. De slutsatser som redovisas tenderar att lämna vetenskapliga fakta och istället frossa i katastroftermer. Se t.ex. <http://spectrum.ieee.org/energy/the-smarter-grid/a-perfect-storm-of-planetary-proportions/0> där försök görs att jämföra en massiv geomagnetisk storm med hundratals samtidiga Fukushima-händelser eller miljontals omkomna inom några månader.

1.5 Tidigare och pågående studier

Både Svenska Kraftnät och Elforsk har tagit fram rapporter rörande GIC:s påverkan på det svenska elsystemet. SvK har i en rapport från år 2001, tillsammans med Vattenfall

och OKG, redovisat om och i så fall var i nätet som det är stora risker med GIC [7]. Det var en studie som gjordes med hjälp av en amerikansk konsultfirma, Metatech. Den visade bl.a. att det var störst risk i södra Sverige.

Elforsk har under år 2003 publicerat en rad rapporter på ämnesområdet. Se referenser [8 – 12].

SvK genomförde år 2005 ett examensarbete rörande transformatorers tålighet mot GIC [13].

Den europeiska rymdorganisationen har utfört studier inom ramen för geomagnetiska störningar. Svenska Kraftnät har följt detta arbete som tyvärr inte givit något mätbart resultat.

SvK medverkar i det pågående europeiska projektet [EURISGIC](#) [14] som drivs av finska meteorologiska institutet och som syftar till att öka förståelsen samt att ta fram modeller för prognoser av GIC för elkraftnäten i Europa. Resultat från detta projekt förväntas först år 2014.

2. Påverkan på kraftsystemet

Kraftsystem kan påverkas av GIC. Det är många skilda faktorer som påverkar vilka konsekvenser en solstorm får på kraftsystemet. Den finns inte en entydig koppling mellan påverkan på kraftsystemet och solstormens styrka. Det som kan hända i elkraftsystem är:

1. Störningar i telekommunikationer
2. Obefogade utlösningar av ledningar och transformatorer
3. Spänningsinstabilitet
4. Transformatorskador

De olika problemen beskrivs vidare i följande avsnitt men först geofysiska grundfakta bakom påverkan på kraftsystemet.

2.1 Geofysiska grundfakta

Påverkan på kraftsystemet beror av flera olika orsaker, t.ex. markens/berggrundens ledningsförmåga och polaritet på det fält som kommer från solen.

För Sverige så har berggrunden i landets södra delar sämre egenskaper för att leda elektricitet jämfört med landets norra delar. Även om landets norra delar ligger närmare norrskenszonen så kan man förvänta sig större påverkan av GIC i landets södra delar.

En påtaglig förändring i markens/berggrundens ledningsförmåga finns vid kuster. GIC-relaterade problem har därför störst sannolikhet för att uppträda i områden där hav och landmassor möts. I Sverige är det känt att området kring Oskarshamn och Malmö påverkas vid solstormar.

Ett i sammanhanget ofta hört uttalande är att öst-västliga ledningar skulle påverkas mer än nord-sydliga ledningar. Detta p.g.a. av att de alstrande electrojetströmmarna oftast är öst-västligt orienterade vilket ger upphov till ett öst-västligt geoelektrisk fält. Men, GIC-problem är mer relaterade till hastigheten på magnetfältsförändringen än till riktningen av det geoelektriska fältet. Slutsatsen blir att alla kraftledningar, oavsett geografisk huvudriktning, kan ansättas vara lika exponerade för GIC relaterade problem [15].

2.2 Störningar i telekommunikationer

Störningar kan uppkomma i telekomsystem som gör att funktionaliteten påverkas. Kommunikation som sker via långa metalliska ledare kan störas. Satelliter kan påverkas av solstormen och ge upphov till allt från kortvariga kommunikationsfel till långvariga fel alternativt total förstörelse av satelliten. Den mest kända händelsen torde vara Skylab som 1979 påverkades av en solstorm till den grad att den återinträdde i jordens atmosfär. Vid Québec-händelsen 1989 blev fyra navigationssatelliter för US Navy utslagna i en vecka [16]. Den 11 januari 1997 slogs AT&T:s kommunikationssatellit Telstar 401 permanent ut i samband med en solstorm. Vid solstormen hösten 2003 påverkades minst 40 satelliter [17].

GPS-satelliterna har omloppsbanor på en mycket hög höjd, 20 000 km. Detta gör att satelliterna befinner sig ovanför jordens jonosfär. Jonosfären är den övre atmosfären som joniseras av strålning från rymden och utgör därför ett plasma. Jonosfären har en hög elektrontäthet och leder elektrisk ström och påverkar därför utbredningen av radiovågor. Jonosfären har inget tydligt slut utåt rymden utan övergår gradvis till magnetosfären. Detta sker vid cirka 1000 km höjd.

Strömmarna i jonosfären påverkas av en solstorm. På grund av att signalerna från GPS-satelliterna måste passera jonosfären så kan GPS-signalen störas, fördröjas alternativt helt försvinna i samband med en solstorm.

2.3 Obefogade utlösningar

GIC-strömmen är, jämfört med normal 50 Hz, att betrakta som likström. Om denna GIC-ström blir tillräckligt stor så ger den upphov till (likströms) mättning av transformatorer. Denna transformatormättning, som sker varje halvperiod av växelströmsperioden, medför att övertoner alstras. Dessa övertoner är av samma karaktär som de som uppträder vid jordfel i nätet. Äldre elektromekaniska reläer som mäter såväl låga som höga frekvenser kan då ge utlösning. I moderna jordströmsskydd är det känsligaste steget övertonsstabiliserat och också mindre känsligt vid låga frekvenser. Tidigare har inga sådana skydd löst ut för GIC men vid solstormen år 2003 löste också övertonsstabiliserade skydd. Stabiliseringen avser andrarton och ej den tredjerton som huvudsakligen uppträder vid mättning av krafttransformatorer.

När det blir en ledningsutlösning sker den i regel endast i en ledningsända. Detta beroende på att ledningsskydden har något olika tidsfördröjning i respektive ledningsända och då ledningen bryts i en ända så upphör transporten av GIC.

Ledningsskydd utformade som längsdifferentialskydd är ibland utrustade med GPS-mottagare för tidsstämpling av uppmätt ström. SvK har inte tillämpat någon enhetlig princip för hur längsdifferentialskydd skall utformas. Ibland används GPS-signal, ibland inte. Ibland är det byggt så att denna typ av skydd blockeras när mätvärdet är osäkert, t.ex. vid osäker tidsstämpling. Ibland är det byggt så att denna typ av skydd byter princip för tidsstämpling, t.ex. fortsätter på egen klocka utan att använda GPS-tid.

Om GPS-satelliterna lämnar felaktiga tidssignaler alternativt att signalerna upphör helt, kan leda till att längsdifferentialskydd som kommunicerar via GPS synkroniserad kommunikation fungerar felaktigt och kopplar ifrån icke felbehäftade ledningar.

Fyra olika möjliga scenarios har identifierats:

1. GPS-signalerna försvinner kortvarigt (< 10 s). Skydden klarar av att hantera detta utan att felfunkera. Under ett kortvarigt avbrott från GPS-satelliterna så använder skydden sin interna tid med bibehållen funktionalitet.
2. GPS-signalerna försvinner långvarigt (> 10 s). Detta medför inte någon risk för obefogad funktion. Det finns två alternativ av inställning av skydden att välja. Alternativ 1, då GPS-signalerna försvinner så blockeras differentialskyddet. SvK använder detta när skydden använder GPS-signal och kommunikation via PDH-systemet (64 Kbit). Alternativ 2, differentialskyddet försätter att fungera, men kommunikationen är då ej GPS synkroniserad utan sker i så kallad Echo mode. Detta är inget problem om kommunikationen endast använder SDH-systemet (2 Mbit).
3. GPS-signalerna ger en felaktig tid. I skydden finns en viss filtrering av tidsmeddelanden, ett felaktigt tidsmeddelande filtreras bort. För att skydden skall svänga in mot en felaktig tid så krävs en kontinuerligt felaktig tid från GPS-mottagaren. Så detta fall bör sannolikt inte leda till obefogad funktion.
4. GPS-tiden driver sakta iväg. Om GPS-mottagaren har kontakt med tillräckligt många satelliter och rapporterar bra tidkvalitet så antar skyddet att tiden är korrekt, trots att tiden driver iväg. Om då tiden i GPS-mottagaren i skyddets motstående ände inte driver iväg på samma vis kommer detta att leda till en obefogad funktion och ledningen kommer att kopplas ifrån felaktigt.

För att komma ifrån risken med obefogad funktion på grund av felaktig/utebliven GPS tid så kan en möjlighet vara att all differentialskyddskommunikation sker över SDH-systemet (2 Mbit).

SvK:s SDH-system kan nog anses så tillförlitligt att GPS synkronisering ej är nödvändig för differentialskyddskommunikationen.

Noteras bör att all nyinstallation av differentialskyddskommunikationen görs i SDH-systemet. Se mer i kapitel 10.

En rätt nyligen identifierad risk är att längre frånvaro av GPS-signal kan medföra risk för obefogade utlösningar i stationer utrustade enligt standard IEC 61850-9-2. Detta p.g.a. av att processbussen är känslig för skillnad i tidsmärkning mellan optiska mättransformatorer. Detta utgör inget problem i dagsläget men måste beaktas så att inte denna eventuella sårbarhet byggs in i våra kommande stationer. Se mer i kapitel 10.

2.4 Spänningsinstabilitet

Spänningsinstabilitet kan uppkomma av olika anledningar. I Quebecstörningen löste sju anläggningar för spänningsreglering inom en minut. En annan orsak till spänningsinstabilitet är att om en transformator utsätts för GIC kan den gå i mättning varje halvperiod. I en sådan situation kommer transformatorns reaktiva effektbehov att öka kraftigt. Detta kan medföra spänningsvariationer som upplevs som att spänningen är "orolig". I värsta fall, om det inte finns tillräckliga reaktiva reserver, kan mättning av transformatorer leda till att spänningen kollapsar.

2.5 Transformatorskador

Om en transformator går i mättning kan skadlig uppvärmning i kärnan eller andra delar uppstå. De transformatorer som påverkas mest är enfaseheter. Därefter är det fembenta trefastransformatorer som är känsliga för GIC. Minst påverkas trebenta trefastransformatorer vars konstruktion medför viss inbyggd tålighet mot GIC.

Om man har två transformatorer av olika generationer men de har samma märkdata vad avser spänning och effekt, så anses generellt sett den äldre transformatorn vara tåligare mot GIC, jämfört med den nyare. Detta beror på att de elektriska, magnetiska och termiska marginalerna i konstruktionen är mindre i nyare transformatorer. Det finns ett antal händelser i världen där transformatorskada uppges ha uppkommit p.g.a. GIC. Det är svårt att belägga att så verkligen är fallet i alla dessa händelser. Cirka tio händelser kan troligen hänföras till skadlig uppvärmning p.g.a. GIC. Det är oklart vilken konstruktion dessa transformatorer haft men i några fall är det stora generatortransformatorer som drabbats och därmed troligen varit utformade som enfaseheter.

Generatortransformatörer går oftast, till skillnad mot systemtransformatorer, nära märklaster. Detta betyder att de som regel har en högre drifttemperatur, vilket i sin tur gör dem känsligare för en extra temperaturhöjning p.g.a. GIC.

3. Gradering av geomagnetiska stormar

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) i USA har infört skalor för att kunna gradera olika rymdväder. En femgradig skala avser geomagnetiska stormar enligt följande (i rak översättning utan egna värderingar), se tabell 1 [18].

Nivå	Benämning	Påverkan på kraftsystemet	Medelfrekvens per solfläckscykel
G5	Extrem	Utbredda problem med spänningshållningen. Reläskydd kan ge problem. Transformatorer kan ta skada	fyra gånger per cykel fyra dagar per cykel
G4	Svår	Möjliga spänningsproblem och möjliga ingrepp från reläskydd	100 gånger per cykel 60 dagar per cykel
G3	Stark	Justering av spänning kan behövas. Reläskydd kan larma felaktigt	200 gånger per cykel 130 dagar per cykel
G2	Moderat	Kraftsystem nära polartrakterna kan spänningsmässigt påverkas. Stormar med lång varaktighet kan ge transformatorskador	600 gånger per cykel 360 dagar per cykel
G1	Mindre	Svaga kraftsystem kan påverkas	1700 gånger per cykel 900 dagar per cykel

Tabell 1 NOAA:s skala för geomagnetiska stormar

Syftet med att i denna rapport återge ovanstående tabell är att införa enhetlig nomenklatur vad gäller styrkan på geomagnetiska stormar. Baserat på historiska händelser så verkar det inte föreligga någon risk för påverkan av det svenska elsystemet vid geomagnetiska stormar upp till och med G3, d.v.s. en stark geomagnetisk storm har inte någon markant påverkan på det svenska elsystemet. Med tanke på ovan angivna frekvenserna av händelser G4 och G5 verkar det inte heller vara så att svenska elsystemet påverkas av alla svåra och extrema händelser. G4 och G5 uppges inträffa i medeltal tio gånger per år med sammanlagt en veckas påverkan per år. Inom projektet EURISGIC [14] skall ett större statistiskt underlag tas fram.

Om man bara inriktar sig på de extrema G5 händelserna så är även den angivna frekvensen och varaktigheten högre än vad historiska uppgifter om påverkan på kraftsystemet kan belägga. En summering av uppgifterna om svenska störningar i kapitel 1 ger att antalet händelser är elva stycken sedan 1958. Antalet dagar med svenska störningar sedan 1958 är tretton stycken. Detta ger att Sverige har upplevt cirka två händelser med cirka tre dagars påverkan per solcykel, d.v.s. halva frekvensen av det som anges för nivån G5 – extrem geomagnetisk storm.

I tabell 2 återges de dagar G4 och G5 nivåer uppmättes sedan 2002-02-01. Äldre data än så finns ej tillgängligt via NOAA:s hemsida. Nivåerna kan ha uppmätts flera gånger under samma dygn. Dagar markerade med rött inträffade även GIC relaterad stamnätsstörning.

Nivå G4 uppmätt	Nivå G5 uppmätt
2003-05-29	2003-10-29
2003-11-20	2003-10-30
2004-07-27	2005-05-15
2004-11-08	2005-09-11
2004-11-10	

Tabell 2 Datum sedan 2002-02-21 då NOAA uppmätt G4 respektive G5 störningar

Av tabell 2 framgår att stamnätet har känt av solstorm uppmätt till nivå G4 men det är inte säkert att nivå G5 ger stamnätsstörning. Sedan 2005-09-11 har ingen G4 eller G5 nivå uppmätts.

4. Den typiska GIC-störningen

Troligen finns det ingen typisk GIC-störning, alla störningar kommer med största sannolikhet att vara unika. Men om man skulle ge sig på att medelvärdesbilda det vi vet om historiska svenska störningar de senaste 60 åren, som har varit av den magnituden att de har påverkat det svenska elsystemet, så ser man en typisk GIC-störning (utan förvarningssystem) enligt följande scenario.

En topp vad gäller variationen av antalet solfläckar inträffade för två år sedan. För drygt två dygn sedan så fick solen ett utbrott som medförde att laddade partiklar slungades mot jorden. Det har nu blivit natt i ett höstligt Sverige och klockan är 02.12. I driftcentralen börjar känslan infinna sig att spänningen i stamnätet är något lägre än normalt eftersom man under de senaste timmarna har fått koppla med shuntreaktorerna på ett sätt som inte är normalt för en höstkväll. Plötsligt löser en kraftledning i södra Sverige. Vid en noggrannare titt på händelsen så ser man att ledningen fortfarande är spänningssatt eftersom ledningen löste i endast ena änden. Kort därefter hör ett regionnätsföretag av sig för att meddela att de haft motsvarande händelse. Efter några timmar är spänningsnivån åter normal i systemet och allting är sig likt igen.

En möjlighet att mer i detalj följa en verklig solstorm inträffade den 24 januari 2012. Dock var denna solstorm av sådan begränsad storlek att det inte påverkade det svenska elsystemet. Händelseförloppet utspelade sig enligt tabell 3.

Datum	Klockslag UTC	Händelse
2012-01-23	04.53	NOAA uppmäter protoner med energinivån 100 MeV
2012-01-24	02.32	NOAA mäter att påverkan på geomagnetiska förhållanden startar
2012-01-24	14.44	NOAA varnar för att störning nivå G1 förväntas starta vilket ögonblick som helst och pågå till 2012-01-25 klockan 01.00 UTC
2012-01-24	15.08	NOAA uppmäter geomagnetisk puls på 22 nT
2012-01-24	19.03	NOAA uppmäter nivå G1
2012-01-24	19.27	NOAA varnar för att störning nivå G2 förväntas starta vilket ögonblick som helst och pågå till 2012-01-25 klockan 01.00 UTC. Nivå G2 uppmäts dock aldrig.

Tabell 3 Händelseförlopp 24 januari 2012

Förkortningen UTC står för koordinerad universell tid. Förenklat kan man säga att UTC och GMT (Greenwich Mean Time) är samma sak. Svensk normaltid är UTC + en timme.

Svensk media använde vid denna händelse stora rubriker såsom

- Solstormen kan slå ut strömmen – Aftonbladet 24 januari
- Varning för solstorm – DN 24 januari
- Solstormen har nått jorden – ställer till problem – Expressen 24 januari

Svenska Kraftnäts kontrollrum märkte inte på något sätt av denna solstorm.

5. Vad har andra gjort?

PJM Interconnection är ett amerikanskt regionalt transmissionsbolag med verksamhet i 13 amerikanska delstater samt i District of Columbia. PJM har utfärdat en manual över driftoperativa åtgärder i samband med störningar. Ett avsnitt behandlar driftåtgärder vid GIC [19].

I korthet så mäter PJM i egen regi GIC och agerar efter egen mätsignal, oberoende av vad myndigheter såsom NOAA har givit för information. När den egna mätsignalen överstiger 10 A med en varaktighet av 10 minuter så skall driftcentralen övergå till driftläggning enligt i förväg framräknade maximala överföringsnivåer. Åtgärderna omfattar inte lastbortkoppling. Den påkallade driftläggningen skall bibehållas under tre timmar efter det att mätsignalen återgått under 10 A.

Bland våra grannländer så är det Finland som varit mest aktivt. Fingrid tillämpar en transformatorutformning som innebär att kortslutningsströmmar reduceras och att transformatorn uppvisar stora förluster vid normal drift. Fördelen, ur ett GIC perspektiv, är att transformatorn får viss inbyggd tålighet mot mätningsfenomen. Ur ett tekniskt perspektiv är deras utformning rätt markant avvikande från det svenska. I Finland tillämpas ibland att man jordar 400 kV transformatorer via ventilavledare, något vi ej gör i svenska stamnätet. Observera dock att Fingrid tillämpar fembent utformning av transformator kärnan vilket inte är optimalt med tanke på GIC. Fingrid mäter GIC på fem olika mätplatser [20]. Fingrid har, på förfrågan från SvK, uttryckt positiv inställning till att utbyta mätdata i realtid ifall SvK inrättar egen eller egna mätpunkter. Därmed finns en öppning för att börja bygga upp ett nordiskt TSO samarbete kring GIC-mätning.

I Norge har Statnett genomfört några mätningar för att få kännedom om vilka GIC nivåer de har. I övrigt har inte Statnett vidtagit några specifika åtgärder. GIC mätningar förekommer även i nordvästra delen av Ryssland. I Storbritannien skall National Grid inom kort återuppta GIC mätningar.

6. Av SvK redan vidtagna tekniska åtgärder

Under 1980-talet förändrades jordfelskyddens utformning i stamnätet. Införandet av övertonsstabiliserade inverttidreläer för bortkoppling av små nollföljdsströmmar, det s.k. JS3, förbättrade stamnätets selektivitet vid jordfel. Reläskyddsbytet under 80-talet medförde även positiva effekter vad gäller tålighet mot GIC [21].

I Sverige finns 313 stamnätsanslutna transformatorenheter. Utav dessa är 211 stycken kärntransformatorer med tre ben och 102 stycken är kärntransformatorer med fem ben eller enfaseenheter. Den förstnämnda kategorin, som är den mest tåliga mot GIC, utgör således 67 % av det stamnätsanslutna beståndet.

SvK:s policy är att transformatorer, så långt möjligt, skall vara utav typ trebenta trefastransformatorer. Jämfört med tidigare, så levereras nuförtiden denna typ av transformatorer i allt högre utsträckning. Detta innebär att stamnätet på sikt bör bli än tåligare mot GIC.

För nya trebenta kärntransformatorer kräver Svenska Kraftnät att dessa skall kunna uthärda en likström med amplituden 200 A under 10 min med samtidig full lastström [22]. Detta krav är baserat med tanke på GIC. Eftersom det är fråga om uppvärmningsproblematik så innebär det att transformatorerna klarar ännu högre likström under perioder understigande 10 minuter. Dessutom har SvK:s transformatorer vanligtvis låg grundlast vilket ytterligare bidrar till termiska marginaler och därmed möjlighet att tåla än större likström.

Ibland är det emellertid inte möjligt att välja denna typ av transformator. Det kan bero på transportskäl och/eller tillgänglighetsskäl. Då man tvingas välja en transformator som inte är av trebent kärntyp, kan man ändå minska denna transformators exponering mot GIC, t.ex. genom att introducera en resistans i transformatorns neutralpunkt.

Vad gäller kontrollrummets beroende av korrekt GPS-signal så är följande identifierat. Drifttelenätet, DTN, har som första synkroniseringsprioritet alltid eget atomur och GPS-mottagare ligger som backup om atomuret fallerar eller om multipla fiberfel uppkommer som skapar öar i drifttelenätet. GPS-mottagarna kommer vid eventuella felaktiga angivelser/signaler att gå över i "holdover mode" och då gå över på sin egen internklocka.

Network Time Protocol, NTP, har GPS som förstahandskälla till tidsinformation. Vid felaktiga angivelser/signaler går NTP över till sin andra prioritet som är drifttelenätets atomur och går sen tillbaks när GPS-signalen är felfri igen.

DTN & NTP är opåverkat så länge kontakt med atomur finns, utan atomur finns ingen påverkan under ett antal timmar.

Vid långvariga GPS-störningar kan man förvänta sig problem med utrustningar som är beroende av korrekt GPS signal, t.ex. fasvinkelmätssystemet, PMU-systemet. Inga systemkritiska system bedöms vara beroende av tillgång till GPS-tid. Se vidare kapitel 14 för arbetsgruppens slutsatser vad gäller GPS-beroenden.

SvK:s system för Tid och Frekvens använder GPS för tidsangivelse med intern klocka som alternativ källa. Om GPS signal uteblir under längre tid så kan behov av korrigering av den interna klockan uppkomma. Detta genom manuell kalibrering mot atomuret.

7. Av SvK vidtagna driftåtgärder

Historiskt har det funnits driftinstruktioner DK 141:1 som 1986 ersattes av instruktion PD 141:1, uppdaterad 1989 som PD 141:2 med titeln *Angående åtgärder vid jordmagnetiska störningar* [23]. Instruktionen byggde på att Vattenfall fick tillgång till resultat från GIC-mätningar från både Televerket och SJ. Instruktionen utgick då mätresultat inte längre blev tillgängligt, någon gång kring år 2000. Exempel på åtgärder som kan vara av intresse för kontrollrummet återfinns i kapitel 12.

Arbetet med att uppdatera driftinstruktion 141:2 är klar.

Det kvarstår att upparbeta rutiner för tillförlitlig förvarning av annalkande solstorm. Diskussion om möjliga förvarningssystem har startat med IRF i Lund som är det regionala centret vad gäller rymdväder.

8. Sverige i förhållande till omvärlden

Inom ämnesområdet för solstormar hörs av och till domedagsprofetior om risken för massförstörelse av utrustningar. Som kontrast finns det länder som anser att GIC inte utgör något hot. Vari ligger denna skillnad i uppfattningar?

I USA har varnats för risken för allvarliga transformatorskador i storskalig omfattning. En skillnad mot Sverige är att mycket större andel av elsystemet i USA är direktjordat och därmed exponerat för GIC. Eftersom Sverige spoljordar från 70 kV och därunder så är den svenska problemställningen mycket mer fokuserad på transmissionsnätet (regionnätsledningar överbryggar kortare avstånd och utsätts därför inte för stora spänningsskillnader mellan transformatorers nollpunkter). En färsk rapport från North American Electric Reliability Corporation (NERC), deklarerar tydligt att USA ändrat hållning och inte längre stödjer hypotesen om transformatorskador i stor omfattning [24].

Finlands elsystem uppges vara motståndskraftig mot GIC. Anledningen verkar kunna härledas till goda marginaler i transformatorers dimensionering och uppbyggnad. Fingrid jordar ibland transformatorer via ventilavledare vilket inte tillämpas av SvK. Denna skillnad i jordningsfilosofi kan, till viss del, möjligen påverka och medföra skillnader när det gäller tålighet mot GIC. Marginalen i dimensionering av SvK:s transformatorer är, i likhet med Fingrids, generellt sett god. En skillnad är dock att Fingrid använder uteslutande fulltransformatorer medan SvK i stor utsträckning använder autotransformatorer. Däremot verkar Svenska Kraftnät använda trebenta transformatorer i större utsträckning än Fingrid som ofta använder fembenta. En markant skillnad är att Fingrid önskar en kortslutningsreaktans på 20 % i sina transformatorer. Detta medför en transformator konstruktion där man tvingas ta hänsyn till läckflöden. En sådan mycket hög reaktans medför stora förluster vid normaldrift. Den övergripande slutsatsen är dock att det inte kan anses klarställt att Fingrids transformatorer är mer tålig mot GIC än den typ SvK upphandlar sedan en tid tillbaka.

Fingrid innehar i princip lika många seriekompenseringsanläggningar som SvK. Sverige är dock till ytan större än Finland och därmed blir de svenska "delsystemen" mellan seriekompenseringsarna till ytan större än motsvarande "delsystem" i Finland. Desto större "delsystemet" är desto större kan potentialskillnaden som driver GIC:n inom delsystemet vara.

9. Pågående studier

I examensarbete "Transformatorers dimensionering med avseende på geomagnetiskt inducerad ström i kraftsystemet", utfört av Katarina Andréasson från Luleå tekniska universitet [13], framkom resultat som på ett konkret sätt påverkade den tekniska riktlinjen för krafttransformatorer, TR1-10E. De framkomna resultaten ledde emellertid till nya frågeställningar som förtjänar att undersökas.

Svenska Kraftnät beslutade därför, i samarbete med ABB, att initiera ett doktorandarbete vid Kungl. Tekniska Högskolan, där Prof. Göran Engdahl under lång tid arbetat med forskning med anknytning till magnetiska kretsar och transformatorer. Projektet startade 2010-02-01 med en planerad licentiatavhandling hösten 2012. Forskarstudier är Seyed Ali Mousavi, som har en bakgrund som anställd på Irans största transformatorfabrik. Hittills har två vetenskapliga artiklar publicerats i tidskrifter och tre artiklar på konferenser. Efter licentiatavhandlingen är tanken att Ali skall fortsätta till teknisk doktor. Målet med projektet är bl.a. att ta reda på hur stora DC-strömmar olika transformatorkonstruktioner tål och hur mycket man måste sänka genomgångseffekten (lastströmmen) om man samtidigt har en DC-ström. I appendix 1 återfinns en närmare beskrivning av doktorandprojektet.

10. Möjliga studier

I detta kapitel återges förslag på olika tänkbara studier inom området för geomagnetiska stormar. Förslagen återges utan inbördes rangordning. De utredningsförslag som förordas framgår av kapitel 14 slutsatser och rapportens inledande sammanfattning.

I avsnitt 2.3 ovan, beskrevs kortfattat risken för obefogade utlösningar av ledningar skyddade med längsdifferentialskydd och risk för problem i kommande stationer utrustade enligt IEC 61850 och då särskilt om vi i framtiden väljer att utrusta stationerna med processbussen IEC 61850-9-2. Processbussen riskerar att vara väldigt känslig för förlust av tidsynkronisering mellan de olika facken i stationen. När ström- och spänningstransformatorer blir optiska och digitala är tidsmärkning troligen den mest kritiska funktionen som måste lösas. Fel i tidsmärkningen riskerar medföra obefogade utlösningar av skydd, t.ex. samlingsskeneskydd. I dagsläget godtar inte Svenska Kraftnät optiska mättransformatorer och därmed finns inte grundförutsättningen för införande av processbussen. Dock finns ett nordiskt projekt tillsammans med STRI AB där det inom projektet finns förhoppningar om att till år 2016 kunna ta i drift en testanläggning med optiska mättransformatorer och processbuss.

Det rekommenderas starkt att SvK utan dröjsmål utreder och dokumenterar i en riktlinje principen för hur tidshållningen skall ske i SvK:s stationer. Denna frågeställning rör flera olika verksamheter inom SvK och bör utredas över avdelningsgränser. Utredningen bör belysa och besvara hur olika krav på tid och takt i stationerna skall uppfyllas samt vilket system som utgör primärt system för tid och takt samt vilket system som utgör sekundärt system. GPS kanske inte skall utgöra vare sig primärt eller sekundärt system för dessa uppgifter.

Som angivits tidigare har Svenska Kraftnät genomfört systemstudie av GIC påverkan på det svenska kraftsystemet. Nedan följer två tänkbara uppslag för fortsatta studier.

- Den studie som slutfördes 2001 var en statisk studie. Misstankar finns om att systemets behov av reaktiv effekt inte återspeglats på ett korrekt sätt i studien. Detta bl.a. beroende på svårigheter att modellera transformatorers ökade reaktiva effektbehov vid mättning. En dynamisk studie skulle medföra en bättre upplösning vad gäller systemets behov av reaktiv effekt. Vid en sådan studie kan t.ex. konsekvenser av lindningskopplarreglering fångas upp. Det är ett omfattande arbete att genomföra en dynamisk studie med en fullständig systemmodell.

- En annan möjlig studie är att uppdatera den statiska nätmodell som användes vid studien 2001 i syfte att kunna köra nya studier. Nya studier kan göras både vad gäller påverkan på stamnätet vid normal driftläggning men skulle även kunna användas för att studera olika driftläggningar som skulle kunna vara aktuella under en geomagnetisk storm, t.ex. frånvaron av vissa transformatornollpunkter i södra Sverige vid exempelvis avställd kärnkraft. Ett annat tänkbart syfte är att i planeringsstadiet vid utbyggnad av stamnätet även inkludera studier för vilken påverkan utbyggnaden får för stamnätets förmåga att hantera en GIC.

Vad gäller transformator konstruktion så finns patent på konstruktion som är immun mot GIC. Hur införandet av sådan konstruktion skulle kunna motiveras måste i så fall utredas. Det är oklart både ur teknisk och ekonomisk synpunkt hur mycket som finns att vinna med denna konstruktion. Konstruktionen är väldigt komplicerad och i praktiken troligen ej intressant [25].

Inställningsvärden och övertonstålighet hos nollpunkts- och överströmsreläer kan behöva ses över och testas. Telestörningsnämnden har krav vad gäller acceptabla nivåer av tredjeton, 150 Hz. Med tanke på mängden optofibrer som idag finns inom telefonisystem så kanske Telestörningsnämndens kravbild inte längre är relevant. Det finns oklarheter i hur moderna reläskydd agerar vid förhållanden som GIC ger upphov till. Stabilisering av reläer mot andraton reducerar risken för felaktig utlösning men garanterar inte felfri funktion. Misstanke finns att även tredje- och sjätteton kan uppkomma vid GIC. Om test av oriktade känsliga jordfelsskydd genomförs så bör man även överväga att testa oriktade nollpunktsströmsskydd och jordströmsdifferential-skydd. En översyn av kravbilden som används vid upphandling av reläskydd bör göras i samband med dessa tester. Om nödvändigt bör även Telestörningsnämndens kravbild gällande 150 Hz ton tas upp till diskussion med nämnden.

Som tidigare nämnts förändrades jordfelsskydden i stamnätet under 80-talet. För elsystemet som helhet kanske det bör undersökas om regionnäten kan genomföra samma förändring, i den mån inte utbyte och förändring genomförts sedan 80-talet. Detta är i så fall en studie som måste göras inom branschen och även förankras hos Telestörningsnämnden om sådant behov finns.

En farhåga finns att de shuntkondensatorbatterier som installerats under SvK:s tid har en utformning av jordningen som gör dem känsliga för GIC. Ingen historiskt inträffad störning har påverkat dessa kondensatorer men i Elforskrapport 03:34 [9] rekommenderas att dessa kondensatorer utreds vad gäller tålighet mot GIC.

De studieresultat som finns vad gäller fördelningen av GIC i systemet utgör endast teoretiska beräkningsresultat. För att kunna belägga att beräkningsresultaten är med verkligheten överensstämmande måste mätresultat från verkliga GIC-störningar finnas. Sådant mätsystem finns endast på en plats i landet och utanför SvK:s kontroll. Införandet av flera mätpunkter skulle kunna ge bättre kunskap om den verkliga fördelningen och nivån på GIC samt genom mätning av övertoner studera hur transformatorerna påverkas av GIC. Införandet av ett mätsystem skulle helt enkelt medföra att vi kan se en pågående geomagnetisk påverkan i elkraftsystemet. Utan mätsystem kan vi inte se påverkan förrän påverkan är så stor att den medför en konsekvens, t.ex. i form av en driftstörning.

11. Möjliga tekniska åtgärder

I detta kapitel återges förslag på olika tänkbara tekniska åtgärder inom området för geomagnetiska stormar. Förslagen återges utan inbördes rangordning. De åtgärder som förordas framgår av kapitel 14 slutsatser och rapportens inledande sammanfattning.

Om Svenska Kraftnät skulle vilja skydda någon eller några av sina autokopplade fembenta transformatorer och bankar av enfasenheter genom att introducera resistans i nollpunkten finns det goda möjligheter till detta. Man skall vara medveten om att införandet av resistans i nollpunkten gör att andra transformatorer i regionen får en ökad påkänning av GIC. En resistans i nollpunkten "löser" inte elsystemets totala påkänning utan "flyttar" det vidare. GIC strömmen måste sluta sig i en sluten strömkrets och kommer att söka sig den väg där motståndet är som lägst.

När det gäller våra fullindade fembenta kärntransformatorer så är nollpunkten på 220 kV sidan helt uppbruten, d.v.s. ingen likström kan flyta. På 400 kV sidan däremot är de konstruerade för att vara stumt jordade. Skulle vi önska jorda dessa via en resistans måste leverantören först vidtalas för att ta reda på huruvida detta är möjligt.

Den enskilda mest värdefulla apparat som kan ta skada av en geomagnetisk storm är transformatorer. Dock finns inga skydd införda i systemet som direkt är till för att skydda transformatorn från GIC. En möjlig teknisk åtgärd är att utveckla speciella skydd vars uppgift är att skydda transformatorn från en skadlig nivå av GIC [8]. Detta betyder inte att transformatorerna idag är oskyddade. Transformatorerna har jordfelskydd som löser ut transformatorn vid 120 A i nollpunkten. Utöver jordfelskydd finns även differentialskydd, temperturvakt och gasvakt.

Införandet av ett eget mätsystem för GIC-mätning på någon eller några punkter i stamnätet, är en åtgärd som skulle möjliggöra bekräftelse på en pågående GIC-störning. Utan mätsystem kan vi förmoda att de konsekvenser vi ser är orsakade av GIC. Med en eller flera mätpunkter skulle vi mer påtagligt kunna se en pågående geomagnetisk störning, förhoppningsvis flera timmar innan eventuella konsekvenser i form av stamnätsstörningar uppstår sig. Kombinerat med övertonsmätning skulle det även vara möjligt att studera hur övertonsinnehållet ser ut vid olika GIC-nivåer och, vid flera mätpunkter, kanske även för olika transformator typer.

12. Möjliga driftåtgärder

För att få kännedom om att en geomagnetisk storm är i antågande behövs ett förvarningssystem. Ett sådant system kan antingen byggas upp i egen regi eller köpas. Utan förvarningssystem så kan kontrollrummet misstänka GIC när:

- det händer saker på vitt skilda ställen samtidigt
- ledningar löser ut endast i en ända
- transformator löser ut
- det är störningar på telekommunikationer

Mätningar av GIC görs vid Oskarshamnsverket. En 30 minuters prognos över GIC strömmen i Oskarshamn publiceras i realtid på hemsidan för Institutet för Rymdfysik i Lund, se [26].

Vid en händelse då kraftsystemet påverkas av en GIC, kan nedanstående åtgärder vara aktuella för SvK:s driftcentraler:

- Avbryta planerade och pågående jobb i syfte att få in så många anläggningsdelar som möjligt i drift. Risken för att någon enskild anläggningsdel överbelastas minskar ifall fler anläggningsdelar kan vara med och dela på GIC:n.
- Följ de vanliga rutinerna och instruktionerna också när det händer något som kan tänkas bero på GIC.
- För att minska risken för spänningskollaps kan behov av omfördelning av produktion finnas i syfte att jämna ut aktuell överföring, d.v.s. minska höga överföringar.

13. Övriga möjliga åtgärder

Vid diskussioner inom branschen har framkommit att regionnätbolag inte regelmässigt införskaffar utrustning tålig mot GIC. Anledningen verkar inte vara kostnadsmässigt grundad utan grundat på vilken leverantör man önskar odla kontakterna med. I syfte att stärka tåligheten mot GIC i elförsörjningen bör stamnätet och till stamnätet anslutna nätdelar, ur ett GIC perspektiv, dimensioneras likvärdigt med SvK:s utrustning.

I anläggningsavtalens tekniska bilaga står att anslutande part MÅSTE följa delar av vår Tekniska Riktlinje TR2 och BÖR följa TR1. Vid senaste uppdateringen av tekniska avtalsvillkor var dessa formuleringar med MÅSTE respektive BÖR uppe för diskussion.

Rent konkret ansluts enligt extern uppgift transformatorer till stamnätet som kunde ha utformats robusta mot GIC men istället utformats enligt mer känslig design. Genom att i anläggningsavtal (och anslutningsavtal) ange att TR1-10E MÅSTE följas ges en tvingande skrivning som torde leda till att anslutande parter använder samma GIC tåliga utformning av transformatorer som SvK själv tillämpar. TR1-10E är skriven i samarbete med Vattenfall AB och skrivningarna måste se över innan tvingande skrivning införs i avtalstext. Fortum använder delar av TR1-10E i sin verksamhet medan E.ON har en egen inköpsspecifikation.

Enligt uppgift ställer Fingrid GIC relaterade krav på transformatorer som ansluts till deras nät.

14. Slutsatser

Nedan följer arbetsgruppens slutsatser vad avser de i rapporten redovisade möjliga studier och åtgärder.

Vid undersökning om vilka GPS-beroenden som finns inom SvK:s verksamhet vad avser tidshållning framkom att ingen företagsövergripande strategi finns vad gäller krav på tid och takt inom olika verksamhetsgrenar. Kravet på korrekt tid och precis takt har ökat under det senaste decenniet. Det finns klara tecken på att kravbilderna kommer att öka än mer i framtiden. Den tekniska utvecklingen pekar på att tidsangivelser i framtida stationer måste vara på μs -nivå mot att det idag räcker med ms-upplösning.

Beslutat byte av driftövervakningssystem innebär också att tidgivning via GPS blir primär tidskälla mot att idag utgöra reservsystem. Uppbyggande av det s.k. PMU-systemet ställer stora krav vad gäller korrekt tidsangivelse.

Reläskyddssystem får, genom införande av differentialskydd för kraftledningar, också ökat beroende vad gäller korrekt takt (nödvändigtvis ej korrekt tid).

Med anledning av ovanstående rekommenderar arbetsgruppen att en utredning tillsätts. Utredningen skall ge förslag på företagsövergripande strategi vad avser primär och sekundär tid och takt inom olika verksamhetsgrenar. Utredningen skall klarlägga inom vilka verksamheter tid och takt skall erhållas från eget atomur och när det kan vara försvarligt att tid och takt erhålls via GPS eller från annat håll. Arbetsomfånget på denna utredning bedöms som relativt omfattande.

Systemstudier av hur en GIC sprids och påverkar kraftsystemet har utförts för över tio år sedan. Mot bakgrund av den expansionstakt stamnätet är inne i blir historiska beräkningsresultat föråldrade. De beräkningar som utförts har varit av statisk karaktär. Teoretiskt kan man tänka sig även tidsberoende (dynamiska) beräkningar. Systemstudierna har dock ett begränsat värde då det idag finns ringa möjlighet att bedöma rimligheten i beräkningarna. För att bättre kunna bedöma rimligheten i storleken på GIC i stamnätet behövs verifierande mätningar. Mot bakgrund av detta föreslår arbetsgruppen att först bör minst en mätpunkt i stamnätet etableras innan nya systemberäkningar genomförs. Mätutrustningar för GIC är globalt sett relativt väl förekommande varvid åtgärden inte bedöms vara särskilt krävande.

Vad gäller transformator konstruktion har SvK redan infört krav på transformatorers uppbyggnad och likströmstålighet. Att införa en helt ny konstruktion speciellt avsedd

för att uppnå immunitet mot GIC är en drastisk åtgärd som arbetsgruppen ej kan rekommendera. Förutom att sådan konstruktion är oprövad så är den dessutom komplicerad till sin uppbyggnad. Det bedöms finnas en överhängande risk att införande av en GIC-immun typ av transformatorer ger negativa tekniska och ekonomiska konsekvenser vida överstigande de eventuella GIC risker som finns med de transformatorer som idag upphandlas. Däremot ser arbetsgruppen en vinst i att alla stamnätsanslutna transformatorer utformas enligt den kravprofil SvK tillämpar för egna transformatorer. Arbetsgruppen rekommenderar därför att kravbilden skärps i SvK:s anslutnings- och anläggningsavtal så att stamnätsanslutna transformatorer får, med SvK, likvärdig tålighet mot GIC. Detta kan relativt enkelt erhållas genom att i avtal göra SvK:s tekniska riktlinje TR1-10E obligatorisk att följa. Riktlinjen är gemensamt framtagen med Vattenfall AB.

Reläskyddens uppträdande vid GIC har granskats i olika utredningar. Genom åren har även åtgärder vidtagits vad gäller skyddens tekniska prestanda. Trots detta så kvarstår vissa funderingar om hur moderna skydd uppträder under ej frekvent förekommande felhändelser, såsom GIC. Arbetsgruppen rekommenderar att kravbilden i SvK:s upphandlingsdokument vad avser reläskydd ses över och att kompletterande skrivningar och kravbild införs i syfte att säkerställa önskvärd reläskyddfunktion även under pågående GIC. Mer information finns under kapitel 10. Arbetsgruppen har inte bedömt det som att något större behov av en branschövergripande utredning finns då problemställningen främst rör stamnätet.

Shuntkondensatorers uppträdande vid GIC-störning kan få stor påverkan på kraftsystemets förmåga att motstå en solstorm. Tidigare utredningar har höjt ett varnande finger för dessa anläggningars förmåga att motstå en GIC-störning, dock utan att utreda och belägga frågeställningen. Med tanke på att flera shuntkondensatorer har införts i stamnätet under de senaste 10-12 åren så bedömer arbetsgruppen det som angeläget att problemställningen utreds. Utredningens omfattning uppskattas till att vara mindre omfattande.

En möjlig teknisk åtgärd för att förstärka enskilda transformatorers tålighet mot GIC är att installera en resistans i dessa transformatorers nollpunkt. Åtgärden är relativt enkel men kan förvärra situationen för andra transformatorer. Arbetsgruppen avstår i dagsläget från att rekommendera denna åtgärd. Det är först när det finns en enskild utpekad transformator som bedöms löpa större risk än andra transformatorer som denna åtgärd bör övervägas för den identifierade transformatorn.

Tidigare rapporter inom ämnesområdet har belyst möjligheten att utveckla särskilda reläskydd för transformatorer som bortkopplar transformatorn vid skadligt hög GIC.

Arbetsgruppens bedömning är att den transformator konstruktion som SvK tillämpar vid upphandling i kombination med de flertal olika transformatorskydd som redan används för att skydda transformatorerna, t.ex. jordfelsskydd på 120 A, medför att nyttan av ett särskilt reläskydd för GIC är begränsat. Arbetsgruppens bedömning är att risken för storskaliga transformator skador är mycket liten. Därmed kan arbetsgruppen inte rekommendera framtagande av särskilda reläskydd för transformatorer särskilt då det är svårt att överblicka vilka utvecklings- och investeringskostnader åtgärden skulle resultera i, för de relativt få transformator enheter SvK innehar.

15. Mer information

Det finns mycket information att hämta på Internet rörande solstormar och GIC, se t.ex.

- Institutet för Rymdfysik i Lund [27].
- Institutet för rymdforskning i Kiruna, magnetogram [28].
- Finska Meteorologiska Institutet [29].
- NOAA, Amerikanska "SMHI" [30-32].
- Europa har förstås en egen prognostjänst [33].
- Kanadas geologiska undersökningar har också en del bra information [34].
- Norrskensaktivitet i Danmark kan ses på [35].
- Northeast Power Coordinating Council i USA hämtar prognoser från Solar Terrestrial Dispatch [36]. Branschrelaterad information finns på [37].
- Solar shield är ett samarbete mellan EPRI (Elforsk i USA) och NASA. Det innehåller också en modell för att räkna ut GIC [38].

Referenser

1. Vattenfall, Jordmagnetiska stormar – en revy, 1973-11-20.
2. Vattenfall, Verkningar i det svenska kraftsystemet av jordmagnetiskt oväder under natten mellan 13 och 14 juli, 1982-07-23.
3. Magnus Wik, The Sun, Space Weather and Effects, Swedish Institute of Space Physics, 2008.
4. Annaklara, störningsinformationssystem hos SvK.
5. <http://www.hydroquebec.com/learning/notions-de-base/tempete-mars-1989.html>
6. http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2008/06may_carringtonflare/
7. http://w3d3.svk.local/W3D3WorkPort/ASP/StandardDocumentForm.asp?TAB=files&DIARY_REF=6&CASE_REF=25263&DOCUMENT_REF=2093427
8. Elforsk rapport 03:33, Solstormar – Transienta geomagnetiska störningar.
9. Elforsk rapport 03:34, Effect of geomagnetically Induced Currents on Protection Systems.
10. Elforsk rapport 03:35, DC magnetisering av generatortransformatorer.
11. Elforsk rapport 03:36, Kostnads- och nyttoanalys av åtgärder mot störningar i elnätet på grund av solstormar.
12. Elforsk rapport 03:37, Jordmagnetiskt inducerade strömmar, GIC – Mvar-behov och resurser.
13. http://www.svk.se/Global/05_Jobb/Pdf/Student-Examensarbete/Exjobb2005_Transformatorers_GIC.pdf
14. <http://www.eurisgic.eu/>
15. Risto Pirjola, Geomagnetically Induced Currents During Magnetic Storms, IEEE Transactions on Plasma Science, vol 28, no 6, december 2000.
16. http://en.wikipedia.org/wiki/Geomagnetic_storm

17. <http://sat-nd.com/failures/index.html>
18. <http://www.swpc.noaa.gov/NOAAscales/index.html#GeomagneticStorms>
19. PJM Manual 13, Emergency Operations, Revision 45, 2011-11-16.
20. Fingrid Corporate Magazine 2/2010,
http://www.fingrid.fi/attachments/en/media/publications/magazine/fingrid_2_2010_en.pdf
21. Stannätsnämndens driftkommitté, Selektiv bortkoppling av små nollföljdsströmmar, mars 1981
22. http://www.svk.se/Global/07_Tekniska_krav/Pdf/TR1-10E-utg6.pdf
23. Vattenfall, PD-Driftinstruktion PD141:2, Angående åtgärder vid jordmagnetiska störningar, 1989-12-01.
24. North American Electric Reliability Corporation, NERC, Effects of Geomagnetic Disturbances on the Bulk Power System, February 2012.
25. <http://www.prv.se/spd/pdf/3FdXcdm9QjWS3oljenFIQ%3D%3D/SE525698.C2.pdf>
26. <http://www.lund.irf.se/gicpilot/gicforecast/forecastgic.html>
27. <http://www.lund.irf.se/rwc/>
28. [http://www.irf.se//Observatory/?link\[Magnetometers\]=On-line_sp_access](http://www.irf.se//Observatory/?link[Magnetometers]=On-line_sp_access)
29. http://aurora.fmi.fi/gic_service/english/index.html
30. <http://www.swpc.noaa.gov/index.html>
31. <http://www.swpc.noaa.gov/today.html>
32. <http://www.swpc.noaa.gov/ElecPower/>
33. <http://sidc.oma.be>
34. <http://www.spaceweather.gc.ca/index-eng.php>
35. http://www.dmi.dk/dmi/nattens_nordlys.
36. <http://www.spacew.com>

37. <http://www.spacew.com/gic/index.html>
38. http://ccmc.gsfc.nasa.gov/Solar_Shield/Solar_Shield.html

Appendix 1

Nedan följer en beskrivning av pågående doktorandprojekt på KTH.

Krafttransformatorer kan utsättas för en överlagrad likström dels i form av GIC och dels till följd av obalanser i ventilstyrningen för omriktartransformatorer. En likström genom transformatorn kommer att förskjuta magnetiseringsförloppet som får till följd att kärnan går i mättning med stigande magnetiseringsförluster, ökad ljudnivå samt kraftigt förhöjt reaktivt effektbehov.

En god förståelse för förloppet är nödvändig för att på ett tillfredsställande sätt bedöma riskerna och konsekvenserna vid likströmsmagnetisering samt möjlighet att bestämma gränserna för tillåten likströmskomponent.

Det kan här tilläggas att GIC-strömmar i verkligheten utgör växelströmmar med mycket låg frekvens, i storlek runt 0,01 Hz.

I doktorandprojektet är inriktningen en trefas krafttransformatorer med trefaseffekter runt 500 MVA och därutöver. Transformatorn antas vara av kärntyp. Transformatorer i trefasutförande omfattar dels transformatorer med ytterben (fembenta transformatorer) och dels transformatorer utan ytterben (trebenta transformatorer).

Kärnan består av cylindriska och vertikala ben som sammanbinds av övre och nedre ok. Kärnben och ok är uppbyggda av ett stort antal plåtar i magnetiskt material, även de vertikalt orienterade. Oken hålls samman av pressbalkar tillverkade i konstruktionsstål (magnetiskt stål). Dessa pressbalkar hålls samman av stålbultar på okens ovan och undersidor, normalt dock ej genom oken. Längs benen hålls nedre och övre ok samman av dragskenor, även de i magnetiskt konstruktionsstål.

Lindningarna är koncentriskt anordnade runt kärnbenet, med ett lindningsarrangemang för varje fas i en trefastransformator. I en enfastransformator finns det normalt ett enda lindat ben och därmed ett lindningsarrangemang, dock kan lindningarna i en enfastransformator vara uppdelade på två eller fler lika och parallellkopplade lindningsarrangemang. De enskilda lindningarna är även de cylinderformade med en i det närmaste jämn strömbeläggning, eller amperevarvsfördelning, längs lindningens axiella utbredning.

Vid en likströmsmagnetisering av en transformator kommer denna att gå i kraftig mättning under ena halvperioden av en spänningscykel medan det inte uppstår någon mättning under den andra halvperioden. Denna form av mättning avviker från de

mättningsfenomen som uppträder vid magnetisering med förhöjd spänning vid normalfrekvens.

Allmänt gäller att magnetiseringsströmmen är kraftigt distorderad med hög övertonshalt. Vid ostörd drift, d.v.s. bl.a. ingen likström genom transformatorn, kommer magnetiseringsströmmen att enbart innehålla udda toner, positiv och negativ halvperiod är varandras spegelbilder (en udda funktion). För det fall transformatorn har en delkopplad lindning kommer merparten av tredje ordningens toner i magnetiseringsströmmen att 'genereras' av deltalindningen inuti transformatorn och tredje ordningens toner från matande nät att bli kraftigt reducerade.

Vid likströmsmagnetisering kommer magnetiseringsförloppet att förskjutas från nollinjen. Tidsintegralen av strömmen över en period kommer då att motsvara den påtryckta likströmmen genom transformatorn.

Det av den påtryckta spänningen genererade magnetiska flödet är proportionellt mot spänningens tidsintegral. Detta flöde återfinns innanför den spänningssatta lindningen, dels i kärnan men även i området mellan kärna och lindning. Vid mättningskommer en inte oväsentlig del att ha sin väg mellan kärna och lindning.

I projektet antas att det matande nätet är relativt styvt, d.v.s. låg inre impedans och att det har ett rent sinusformat förlopp. Vidare är nätet symmetriskt, d.v.s. försumbar minusföljdskomponent och nollföljdskomponent i spänning.

I projektet ingår:

- Modellering av flödesväg som funktion av påtryckt spänning och likström
- Bestämning av förlustutveckling som funktion av påtryckt spänning och likström
- Bestämning av reaktiv effektförbrukning i transformatorn som funktion av påtryckt spänning och likström
- Bestämning av uppträdande H-fält längs massiva konstruktionselement som pressbalk och dragskena
- Eventuell tvärmagnetisering i kärnplåtar, även innefattande flödesrepellation till följd av cirkulerande strömmar i plåtarna

Målsättningen är att resultaten som framkommer under forskningsarbetet skall kunna användas av SvK till att:

- Ange lämpliga krav vid upphandling på tålighet av likström för olika transformator konstruktioner, såsom trefas kärntransformatorer utan ytterben, dito med ytterben, samt enfastransformatorer.
- Ange lämpliga gränser på befintliga transformatorer för DC-magnetisering
- Ange hur en transformators genomgångseffekt måste reduceras då en likström flyter genom denna

Vidare förväntas vi efter projektets slutförande bättre kunna bedöma:

- Vilka fenomen som uppträder i transformatorn då den magnetiseras med likström
- Vilka delar av transformatorn som är mest kritiska
- Vilka risker som finns för permanenta skador på transformatorn
- Vilka transformator typer som är speciellt utsatta
- I vilken utsträckning man kan styra känsligheten mot likström genom att anpassa konstruktionen
- Vilka transformatorer som riskerar att haverera under en solstorm
- Om man kan göra mätningar på transformatorer för att fastställa deras känslighet mot DC-magnetisering.