

Tj-ställe/Utgivare
UINKEA Mats Bäckström
Tj-ställe/Fastställd
UINKEA Per Hagström

Datum
2011-09-15
Informationsklass
INTERN

Mottagare
Elsäkerhetsverket:
Horst Blüchert, Teknisk Direktör
Elin Cederholm,
Verksamhetscontroller

Ärende

Förstudie: Skydd mot elektromagnetiska risker. Geomagnetiskt inducerade strömmar (GIC).

Bakgrund, syfte

I denna rapport redovisas resultatet av en förstudie inom ämnesområdet *Skydd mot elektromagnetiska risker*. De två typer av elektromagnetiska risker som avses är, i första hand, avsiktliga elektromagnetiska störningar (IEMI) och också, till en mindre del, geomagnetiskt inducerade strömmar (GIC). I detta dokument redovisas resultatet av arbetet inom området geomagnetiskt inducerade strömmar (GIC; *Geomagnetically Induced Currents*). Förstudien är finansierad av Elsäkerhetsverket och har som syfte att ge underlag för beslut om inriktning mm. till projektet *Skydd mot elektromagnetiska risker*, se [1]. Förstudien har följande syften [1, 2]:

- Att ge konkreta förslag på mål och verksamheter (sårbarhetsundersökningar, kravsättning avseende tålighet, FoU mm.) inom respektive område (IEMI resp. GIC).
- Att ge förslag på former för verksamheten, såsom referensgrupper och förslag på deltagande organisationer i dessa.
- Att beskriva tidigare FoU-verksamheter inom akademi och industri inom de två områdena.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Bakgrund, syfte	1
INNEHÅLLSFÖRTECKNING.....	2
1 Inledande kommentarer	3
2 FORMER FÖR VERKSAMHETEN.....	3
2.1 Övrigt	4
3 GEOMAGNETISKT INDUCERADE STRÖMMAR (GIC).....	4
3.1 Bakgrund.....	4
3.2 Rymdväder och dess effekter på elektriska och elektronikbaserade system	7
3.3 Geomagnetiskt inducerade strömmar (GIC), effekter och skydd	9
3.3.1 Höghöjds-EMP. Likheter med GIC	9
3.3.2 Effekter av GIC på elkraftsystem	9
3.3.3 Effekter av GIC på järnvägssystem	21
3.3.4 Effekter av GIC på telekomsystem	21
3.3.5 Effekter av GIC på pipelines	22
3.4 Geomagnetiskt inducerade strömmar (GIC), förslag på verksamheter	22
4 Erkännande.....	25
5 Referenser och litteratur.....	26
6 Förkortningar.....	31

1 Inledande kommentarer

Som framgår ovan så har detta uppdrag bestått i att formulera förslag på verksamheter och organisation inom områden Intentional EMI och GIC (området Intentional EMI redovisas i en separat rapport, se [71]). Eftersom GIC till stora delar är en ny bekantskap för författaren anges i vissa fall (då osäkerhet råder om den rätta översättningen) tekniska termer på engelska.

En slutsats baserad på den litteratur som studerats och också av samtal med sakkunniga inom och utanför Sverige är att såväl analyser av elkraftnätets sårbarhet som vissa åtgärder för att stärka tåligheten mot GIC väsentligen kan göras med hjälp av befintliga verktyg och ingenjörskunskaper. Ett viktigt undantag från detta är forskning avseende förbättrade metoder för prognostisering, men inom detta område deltar Sverige redan i ett EU-projekt. Det ter det sig alltså knappast motiverat att i nuläget lägga huvuddelen av de resurser Elsäkerhetsverket disponerar på akademisk forskning. Däremot kan t.ex. utveckling av bättre metoder för modellering av mätnads- och skadeeffekter i transformatorer, eller utveckling av reläskydd för krafttransformatorer, med fördel göras i nära samarbete arbete med UoH. Likaså kan konkreta åtgärder för att stärka tåligheten mot GIC komma att peka på behov av framtida forskning. Ovanstående slutsats, som naturligtvis måste diskuteras med experter inom området, reflekteras i de förslag på verksamheter som finns i kapitel 3.4 nedan.

2 FORMER FÖR VERKSAMHETEN

Verksamheten organiseras förslagsvis på så sätt att projektägaren (Elsäkerhetsverket) med stöd av en styrgrupp beslutar om projektets inriktning och om deltagande organisationer och företag. Som stöd till projektet i tekniskt/vetenskapliga frågor utses en referensgrupp av sakkunniga. I vissa fall kan projektet med fördel uppdelas i olika delprojekt med olika referensgrupper.

I styrgruppen deltar lämpligtvis Elsäkerhetsverket, MSB, PTS, Fortifikationsverket, Elforsk samt kanske andra aktörer från SOTI (Samverkansområde Teknisk Infrastruktur). Möjligen kan även Trafikverket (f.d. Banverket) vara av intresse.

Sammansättningen av referensgrupperna bestäms av valet av inriktning på verksamheten enligt förslagen i kapitel 3.4. Som utgångspunkt hämtas representanter lämpligtvis ur den lista av aktörer som ges i kapitel 3.3.2.5 "Verksamheter inom GIC i Sverige".

En övergripande fråga för styrgruppen är att försöka se till att projektet inte bara utförs på ett professionellt sätt utan att man även bidrar till att skapa kompetensgrupper inom för området centrala färdigheter. På grund av projektets begränsade budget bör man överväga möjligheten till samfinansiering från andra aktörer (jfr. kapitel 2.1 nedan).

2.1 Övrigt

Medfinansiering om 25% kan eventuellt vara möjlig från EU-projektet InnoEnergy, *Smart Electric Grid and Storage*, delprojektet *Controllable and Intelligent Power Components* som bedrivs på KTH.

3 GEOMAGNETISKT INDUCERADE STRÖMMAR (GIC)

3.1 Bakgrund

Solvinden är ett flöde av laddade partiklar, främst elektroner och protoner, som fortlöpande skickas ut från solen. Växelverkan mellan solvinden och jordens magnetfält medför att detta pressas samman på dagsidan och sträcks ut till en svans på nattsidan. Denna växelverkan ger upphov till jordens s.k. magnetosfär, som skyddar oss från energirika partiklar [3, 4]. Kraftiga utkastningar av massa från solen s.k. CME:s (*Coronal Mass Ejections*, koronamassutkastningar) och soleruptioner (eng. *flares*) kan ge upphov till s.k. geomagnetiska störningar, dvs. tillfälliga störningar av magnetosfären och jonosfären. Storleken av dessa beror av solvindens hastighet, densitet och dess magnetfält. Om magnetfältet är riktat motsatt den riktning det geomagnetiska fältet har på jordens dagsida fås en stark störning, dvs. en geomagnetisk storm (detta gäller CME:s men inte riktigt för soleruptioner). Dessa geomagnetiska stormar ger upphov till kraftiga strömmar i magnetosfären och i jonosfären vilka i sin tur genererar störningar i det geomagnetiska fältet i form av i tiden varierande magnetfält vilka inducerar elektriska fält vid jordytan, s.k. geoelektriska fält [5, 6]. Dessa fält kopplar till elkraftledningar, teleledningar, pipelines (dvs. rörledningar för transport av olja eller gas) etc. varvid geomagnetiskt inducerade strömmar (GIC, *Geomagnetically Induced Currents*) uppstår. Geomagnetiska stormar är en del i begreppet rymdväder som avser de förhållanden i rymden som påverkar jorden och dess teknologiska system.

Variationerna i magnetfältsflödet, dB/dt , är långsamma, långt under 1 Hz och brukar betecknas som kvasi-DC. Den på så sätt geomagnetiskt inducerade strömmen, GIC, har sitt frekvensinnehåll typiskt i området 0.01 till 0.001 Hz [7]. De geomagnetiska stormarna är mer sannolika då maximum inträffar i solcykeln (se nedan), men kan förekomma, med lika hög intensitet, också mellan dessa maxima [8, 9, 10, 51].

Solcykeln är benämningen på de variationer i solfläcksantalet och solaktiviteten i allmänhet som sker med en ungerfärlig cykeltid på 11 år. Senaste maximum inträffade runt år 2000 och enligt uppgift förväntas nästa inträffa under 2013 [11]. Antalet solfläckor har registrerats sedan 1749 och en solcykel räknas mellan två minima (det första minimumet registrerades 1755) [12]. Detta betyder att vi nu befinner oss i cykel 24.

Det geoelektriska fält som driver GIC är störst i regioner som befinner sig nära polarzonerna och som samtidigt har hög markresistivitet [9, 13, 14, 12]. Höga geoelektriska fältstyrkor kan också uppstå vid tvärs förändringar i resistivitet t.ex. vid en kustlinje [8]. Ett exempel på det senare förhållandet är de inducerade fält som ledde till elavbrottet i Malmö 2003, se nedan.

Man har sett verkan av geomagnetiska stormar sedan 150 år tillbaks i tiden [8, 12]. De första effekterna av GIC noterades på telegrafsystem på 1840-talet och senare har geomagnetiska stormar orsakat spänningsbortfall på i första hand el- men också telesystem.

Den första rapporterade effekten på elkraftsystem härrör från USA och Kanada och daterar sig till mars 1940 [8]. Den händelse som betraktas som mest extrem var den spänningskollaps man erhöll i Quebec med omnejd i mars 1989 då 6 miljoner människor var utan elektricitet under 9 timmar. Ett annat av de mest uppmärksammade elavbrotten pga. en geomagnetisk storm inträffade i oktober 2003 i Malmö då 50 000 abonnenter var utan el uppmot en timme. Också pipelines har påverkats när det gäller ökad risk för korrosion och störning av system som används för övervakning av korrosion. De i särklass största problemen under de senaste 70 åren har, av den rikhaltiga litteraturen att döma, uppenbarligen gällt elkraftnäten.

De potentialskillnader som uppstår i marken p.g.a. det geoelektriska fältet driver en ström via direktjordade transformatorers nollpunkter upp till kraftledningen, se t.ex. [15]. (Alternativt kan man se det som att det geoelektriska fältet inducerar strömmar i elkraftnätet som leds ner i marken via transformatorers nollpunkter). Denna ström driver transformatorn i halvcykelmättningsvarvid övertoner uppstår som kan utlösa reläskydd mm. med strömavbrott som följd. Det största problemet uppges dock vara risken för spänningskollaps orsakad av den våldsamma ökningen av behovet av reaktiv effekt som mättningsavlastning av transformatorer kan ge upphov till, se t.ex. [16]. Man har även haft problem orsakade av upphettning av transformatordetaljer, vilket kan orsaka degradering och även permanenta skador "beyond repair", se [17].

Det är alltså mättningsfenomenet i transformatorerna som ger upphov både till problemen med själva transformatorerna och med stabiliteten i elnätet (det senare orsakat av behovet av reaktiv effekt och av oönskade operationer hos reläer och skyddssystem). Påkänningen, dvs. GIC-nivån, på elnätet beror, förutom av den geomagnetiska stormens intensitet, också av närheten till jordens nord- och sydpol, markens resistivitet, längden och orienteringen av kraftledningarna mm.

De i elnätet inducerade strömmarna orsakas av de i tiden varierande magnetfälten, dB/dt som uppstår pga. geomagnetiska stormar. Som beskrivits ovan ger dessa variationer i magnetfältet upphov till en elektrisk fältstyrka vid marken som inducerar strömmar i kraftnät och andra elektriskt ledande strukturer. Storleken av denna elektriska fältstyrka beror, förutom av dB/dt också av markens resistivitet och hur denna varierar med djupet under markytan och längs med denna, se kapitel 3.3.2.1 nedan. För att karakterisera den geomagnetiska störningen används olika typer av index baserade på mätningar av dB/dt , se [18, 13]. Variationer i magnetfältet på upp till cirka 2500 nT/min har rapporterats, se [18, 19, 41]. Dessa extrema nivåer har uppmätts i de nordiska länderna och i Nordamerika. Det hävdas [20, s. 74], [21, s. 1-30] att nivåer på 5000 nT/min betraktas som möjliga i ett extremfall. Som jämförelse kan nämnas att man i samband med den omfattande spänningskollapsen i Quebec 1989 "bara" mätte upp 400 nT/min [19].

För det geoelektriska fältet vid marken har uppmätta fältstyrkor på upp till 20 V/km rapporterats. Denna nivå uppmättes i samband med en geomagnetisk storm 1922 [14, 16]. Denna nivå, som benämns *svår* ("severe") i [16] nedan, anses kunna inträffa 1-2 gånger per årtionde och beräknas svara mot ett dB/dt lika med 3600 nT/min [16]. I en studie av den extrema s.k. Carrington-händelsen 1859 uppskattas fältstyrkan vid jordytan också i extremfallet kunna uppgå till 20 V/km, se [22, 21]. Detta anses svara mot den värsta stormen under en hundraårsperiod, vilket i kapitel 3.4 benämns *extrem* storm. Att en extrem storm inte förväntas ge mer än de 20 V/km som enligt [16] karakteriserar en *svår* storm kan bero på att de geologiska förhållandena i Nordamerika skiljer sig mot de i de nordiska länderna. Den geoelektriska fältstyrkan härleds nämligen från det värde på dB/dt som induceras av den geomagnetiska stormen och detta innebär att värdet på den geoelektriska fältstyrkan beror av lokala parametrar såsom markens resistivitet. Mycket talar alltså för att det vore bättre att istället använda värdena på dB/dt för att definiera de olika kategorierna *extrem*, *svår* etc. (enligt [21, s.1-30] anges t.ex. $dB/dt = 5000nT / \text{min}$ som ett *extremt* värde på dB/dt).

Det kan i sammanhanget vara av intresse att notera att orsaken till att tidsderivatan av det magnetiska flödet (3600 nT/min svarar ju bara mot 60 nT/s) kan ge ett så stort värde på det geoelektriska fältet som 20 v/km är att inträngningsdjupet för strömmen i jordytan i detta fall är mycket stor, se [14]. I den enkla modell som används i [14] är inträngningsdjupet hela 310 km¹.

Storleken av inducerade strömmar på kraftnäten har, liksom mätningar av magnetfält och elektriska fält, uppmätts på olika platser och vid olika tillfällen. Det högsta värdet som framkommit i föreliggande genomgång av litteratur i ämnet, nära 300 A (100 A per fas)², uppmättes den 6 april 2000 i en transformators nollpunkt (Simpevarp-2) nära Oskarshamns kärnkraftverk³. Detta uppges vara den högsta GIC-nivån som rapporterats [5]. Mätningar på denna transformator pågick mellan 1990 till slutet av 2000 (då en 5 Ohms resistans installerades i transformatorns nollpunkt som skydd mot GIC) [10, 5]. Resultaten av mätningarna indikerar att varaktigheten av en GIC överstigande 200 A i normalfallet rör sig om minuter men att många värden större än 100 A kan fås inom en period om 36 timmar. Medelvärden på omkring 15 A under ½ timme har observerats [10].

I samband med spänningskollapsen i Quebec 1989 uppstod permanenta skador "beyond repair" på en transformator i Salem, New Jersey, och på en annan uppstod liknande men mindre omfattande skador, se [17]. Man uppskattade strömmen i nollpunkten till 224 A (dvs. 74.7 A per fas). Fotografier på den förstörda transformatorn finns i [12, 20] och på hemsidorna [23] och [24]. En något utförligare beskrivning av Salem-transformatorns skador ges i kapitel 3.3.2.3 nedan.

¹ Detta ger en integrationsyta för magnetfältet, räknat på 1 meters ledningslängd, lika med 310 000 kvadratmeter, vilket med hjälp av induktionslagen ger en uppskattning av den geoelektriska fältstyrkan lika med $3.1 \cdot 10^5 \cdot 60 \cdot 10^{-9} = 0.02 \text{ V/m}$ dvs. 20 V/km.

² I [5] anges maxvärdet 269 A, i [10, 12] anges 320 A.

³ Betydligt högre värden på strömmen har enligt beräknade data förekommit vid andra tillfällen, se kap. 3.3.2.3.

Halvcykelmätnad uppges kunna uppstå redan vid låga strömmar, i [16] anges 5-10 A, i [19] några Ampère och i [13] några 10-tal Ampère.

Påverkan av GIC på de svenska och norska elkraftnäten har rapporterats vid ett flertal tillfällen, särskilt kan åren 1960, 1982 (då också problem uppstod för järnvägens signalsystem), 1989, 1991, 2000 [10, 16, 12] och 2003 [5] noteras. Den geomagnetiska stormen 2003 i Sverige ledde till att 50 000 abonnenter var utan el uppemot en timme och ses i [25] som en av de viktigaste GIC-händelserna vid sidan av den i Quebec 1989, som allmänt betraktas som den mest katastrofala. När det gäller Finland har (åtminstone fram till 2002) inga allvarliga problem rapporterats även om höga strömmar, upp till 200 A, i transformatorers nollpunkter rapporterats ge upphov till övertoner pga. mättning, se [26]. I [8] uppges det att en orsak till frånvaron av problem i Finland är att man valt sina transformatorer på så sätt att de sällan arbetar på högsta kapacitet.

Som kommer att framgå nedan så finns ett antal skyddsåtgärder att ta till för att lindra verkan av GIC. Uppenbarligen står bättre och mer tillförlitliga prognosverktyg än de nu befintliga högt på önskelistan. För att få tillräckligt lång förvarningstid, omkring en timme anses nödvändigt för att adekvata skyddsåtgärder på elkraftnätet såsom bortkoppling av kritiska transformatorer ska hinna utföras, behöver man tillgång till data om solvinden från satelliter. Verksamheter för att ge denna typ av prognoser pågår i både USA och Europa.

Beräkningar som gjorts på det nordamerikanska elnätet visar att verkningarna av en *extrem* geomagnetisk storm skulle kunna betyda att mer än 350 transformatorer riskerar att skadas på ett irreparabelt sätt [20, s. 74], [51] och att en sådan skada kan ta upp till flera år att fullständigt återhämta sig från. I USA har det under senare år pågått en stundtals intensiv diskussion om nödvändigheten att skydda viktiga samhällsfunktioner mot både avsiktliga elektromagnetiska hot (Intentional EMI och HEMP, dvs. en elektromagnetisk puls orsakad av en kärnvapensprängning på hög höjd, se kapitel 3.3.1 nedan). Särskilt har problematiken kring hur man ska ställa sig till händelser med låg sannolikhet som kan ge stora konsekvenser ("high-impact, low-frequency event risks") diskuterats.

Denna diskussion har resulterat i ett lagförslag, *Shield Act*, H.R.668, [27]. Lagförslaget har som syfte att tvinga nätägarna i USA att skydda vitala delar av sina anläggningar mot GIC, HEMP och Intentional EMI. Detta lagförslag framlades den 10 februari 2011 som ersättning för ett tidigare snarligt lagförslag, H.R.5026 (*the Grid Act*). H.R.5026 godkändes under våren 2010 enhälligt av Representanthuset men hann aldrig behandlas av Senaten innan utgången av den tvååriga förfallotiden för lagförslaget. H.R.5026 innehöll förutom ovan nämnda hotbilder även IT-säkerhet. Det senare plockades bort från det nu liggande lagförslaget, enligt uppgift beroende på att man anser att IT-säkerhet täcks av annan lagstiftning.

3.2 Rymdväder och dess effekter på elektriska och elektronikbaserade system

Fokus för denna rapport är, som framgår av uppdragets beskrivning, geomagnetiskt inducerade strömmar (GIC) orsakat av rymdväder, men eftersom t.ex.

elkraftförsörjningen är beroende av annan teknisk infrastruktur så nämns här i korthet även andra typer av effekter än de som orsakas av GIC. Exempel på system som kan drabbas av andra typer av påverkan är:

- **Radio- och satellitkommunikation** (pga. störningar i jonosfären). Detta är ett område av betydelse bl.a. för det militära försvaret. Enligt [28] har det hävdats att det amerikanska försvarets intresse för rymdväder är centrerat till dess effekter på kortvågskommunikation och på kortvågsradar. I kortvågsområdet, 3 – 30 MHz, sker vågutbredningen till del genom reflektioner i jonosfären. Förändringar i jonosfären pga. rymdväder kan leda till degradering och borttoning av signalen. En annan, mer specialiserad, rapport i ämnet har nyligen publicerats av FOI. Den behandlar rymdvädrets påverkan på Försvarsmaktens tekniska system (trådlös kommunikation och GPS) och de förmågor som är kopplade till dessa [29]. Även satellitkommunikation kan påverkas av förändringar i jonosfären, framför allt genom scintillation, dvs. slumpmässiga variationer i fas och amplitud hos radiosignaler som passerar jonosfären [28].
- **Navigationssystem** (t.ex. GPS). GPS-funktionen kan störas av variationer i elektrondensiteten i jonosfären samt av scintillationer. Båda dessa fenomen kan orsakas av en geomagnetisk storm. På så sätt kan positionsfel uppstå eller, för kraftiga scintillationer, att mottagaren förlorar signalen. System som nyttjar GPS för tidhållning kan också drabbas. Eftersom GPS är ett ganska nytt system så är det inte riktigt klarlagt vilka typer av effekter ett solmaximum kan ha på användningen av GPS och andra satellitnavigeringssystem, se [28].
- **Flygplan.** Fel i elektronik, s.k. SEE (*Single Event Effects*) kan uppstå pga. högenergetiska partiklar. Inducering av felaktiga tillstånd eller data ("*soft errors*") p.g.a. SEE är vanliga. Permanenta skador ("*hard errors*") är dock ovanliga. Inget haveri eller allvarlig incident har bevisats bero på SEE, men ter sig i vissa fall som en sannolik orsak. Genom rätt val av komponenter och andra skyddsmetoder kan risken för störning minimeras [30, 31].
- **Satelliter.** I första hand uppladdning (*surface*, eller *differential*, *charging*) men även SEE kan orsaka störning och skada på satelliter. Också ett fenomen kallat *deep-dielectric charging*, dvs. deposition av elektroner i dielektriska material i satellitens inre delsystem, kan leda till elektriska urladdningar som kan äventyra satellitens funktion, se [11]. Uppladdning uppstår då satelliten passerar genom regioner med hög täthet av (eller energi hos) laddningar vilket leder till att spänningsskillnader uppstår mellan olika delar av satelliten. Dessa spänningsskillnader kan, om inte adekvata skyddsåtgärder införts, leda till elektriska urladdningar som kan påverka vitala komponenter. På hemsidan för EU/FP7-projektet SPACECAST [32] uppges att en geomagnetisk storm 2003 orsakade funktionsstörningar ("*disruption*") hos 47 satelliter. Det uppges vidare att en superstorm skulle kunna medföra skadeverkningar till ett värde av 30 miljarder US dollar. Syftet med projektet

SPACECAST är att "help protect satellites on orbit by modelling and forecasting high energy particle radiation".

- **Övrigt.** Risken för effekter på elektronik placerad på marken har tidigare betraktats som obefintligt men har rapporterats, t.ex. för en bank i Quebec 1989 [33]. I guidelinen SEEDER ("Single Event Effects Design for Electronics Reliability"), [34, s. 16], uppges att den ökande miniatyriseringen, lägre arbetsspänningar och det ökande antalet transistorer har ökat problemen med SEE (*Single Event Effects*) för utrustningar på marknivå. Man pekar också på att det idag krävs ansenliga insatser att konstruera stora markbaserade system så att de blir immuna mot SEE.

3.3 Geomagnetiskt inducerade strömmar (GIC), effekter och skydd

Som framgått ovan så ligger fokus när det gäller GIC i litteraturen till allra största del på dess påverkan på elkraftnätet. Vissa rapporter finns också om smärre problem för järnvägen medan rapporter avseende problem för telekomsystem och pipelines är svåra att hitta (verkan på pipelines är väl för övrigt knappast av intresse ur svensk synpunkt). Detta gör att den huvudsakliga inriktningen i denna rapport hamnar på elkraftsystem och i någon mån järnvägen.

3.3.1 Höghöjds-EMP. Likheter med GIC

Som framgår av projektplanen [1] så omfattas verkningarna av en kärnvapensprängning på hög höjd (> 30 km), en s.k. HEMP, inte i föreliggande studie. Det kan i sammanhanget ändå påpekas att verkningarna av den sena s.k. E₃-komponenten av en HEMP är snarlika de från en geomagnetisk storm, se t.ex. [20, 22]. Ytan som täcks av en HEMP, och som beror av kärnvapenexplosionens höjd, är typiskt mindre än den från geomagnetisk storm men kan ändå täcka en ansenlig del av en kontinent. Fältstyrkan vid jordytan beräknas kunna uppgå till 40 V/km [22] dvs. omkring dubbelt så hög som den som förväntas för en extrem geomagnetisk storm .

3.3.2 Effekter av GIC på elkraftsystem

Alla problem orsakade av GIC på elkraftsystem kan härledas till den verkan GIC har på transformatorerna i nätet. Strömmen tar sig, som framgått ovan, in och ut genom transformatorernas nollpunkter. GIC ger upphov till en likströmskomponent som driver transformatorn i mättningsvarannan halvcykel. Som nämnts ovan så uppstår mättningsuppstår redan vid några eller några 10-tal Ampère, mer om detta nedan. Pga. mättningsfenomenet fås olinjära förhållanden varvid övertoner genereras, vilket kan leda till uteblivna och obefogade reläskyddsfunktioner och påverkan på andra kraftutrustningar, såsom oönskad uppvärmning av generatorrotorer [10, 15]. I Elforskrapporten [35] ges en mycket omfattande beskrivning av effekter av GIC på skyddssystem, rapporten innehåller också en omfattande biografi över området. I [35, 15] konstateras att oönskade funktioner hos reläskydd under en geomagnetisk storm kan orsaka en svår systemstörning eller i värsta fall en total kollaps av elsystemet. Mättningsfenomenet medför också att magnetfält läcker ut från kärnan vilket kan leda till upphettning av metallstrukturer i transformatorn. Mättningsfenomenet leder också till att magnetiseringsströmmen kan öka dramatiskt, i [10] anges att

magnetiseringsströmmen kan öka med flera tiopotenser. Eftersom magnetiseringsströmmen ligger 90 grader ur fas med spänningen kan detta ge upphov till stora reaktiva förluster i transformatorn. Dessa reaktiva förluster kan i värsta fall leda till ett behov av reaktiv effekt i kraftsystemet som överstiger den tillgängliga kapacitet, och därigenom leda till spänningskollaps [10, 15].

Observera att även problem som inte är relaterade till GIC, såsom störning av kommunikationer, kan tänkas påverka elnätets funktion.

3.3.2.1 Faktorer av betydelse för uppkomsten av GIC

Enligt [9, 13] så bestäms GIC-nivån av två grupper av faktorer:

“(I) Extent and strength of the horizontal electric field in the power system. This geoelectric field is dependent on the following factors:

- ionospheric currents which vary as functions of time and space.
- earth’s conductivity which varies as a function of space by as much as five orders of magnitude.
- proximity of the power system to the auroral zone.

(II) Electrical system characteristics:

- orientation of the transmission lines (north-south vs. east-west)
- lengths of transmission lines
- electrical dc resistance of the transmission conductors and transformer windings
- transformer type and mode of connection
- method of station grounding and resistance”

När det gäller orienteringen av transmissionsledningarna så gäller i allmänhet att det geoelektriska fältet är större i öst-västlig riktning än i nord-sydlig riktning, dvs. att GIC-nivåerna i allmänhet blir högre för transmissionsledningar i öst-västlig riktning än för ledningar i nord-sydlig riktning, jfr. [14].

3.3.2.2 Påverkan på elnätet och dess konsekvenser

Effekter av GIC på krafttransformatorer beskrivs i nästa kapitel. Här beskrivs kortfattat de följdfel som kan uppstå pga. den halvperiodiska mättnings av direktjordade transformatorer som GIC kan ge upphov till. Denna mättnings medför att övertoner genereras, vilket kan leda till uteblivna och obefogade reläskyddsfunktioner och påverkan på andra kraftutrustningar. Oönskade funktioner hos reläskydd under en geomagnetisk storm kan, som redan nämnts, orsaka en svår systemstörning eller i värsta fall en total kollaps av elsystemet. Mättnings kan vidare ge upphov till stora reaktiva förluster som i värsta fall kan överstiga nätets

tillgängliga kapacitet att hantera dessa, och därmed leda till spänningskollaps. Underlaget nedan utgörs av rapporter rörande svenska förhållanden.

I en rapport från Svenska Kraftnät (SvK) daterad april 2001 [10] presenteras resultatet av en mycket omfattande studie avseende sårbarheten map. GIC för det svenska transmissionsnätet. Studien, som bedrevs i samarbete mellan SvK, Vattenfall, OKG och norska Statnett föregicks av en studie om GIC utförd av SvK och OKG under åren 1997 – 1999. Analyserna av det svensk-norska kraftnätet utfördes med hjälp av programpaketet PowerCast från Metatech i USA. Personal från Metatech medverkade också med know-how i projektet. Analyserna utfördes för tre standardiserade nivåer på det geoelektriska fältet, geomagnetisk storm vid *låg nivå* = 1 V/km ("low level"), *måttlig* geomagnetisk storm = 10 V/km ("moderately intense storm") och *svår* geomagnetisk storm = 20 V/km ("severely intense storm"). Det anges i rapporten att en måttlig geomagnetisk storm förväntas inträffa 1 – 2 gånger under en tioårsperiod. Dock anges i [16], som är en sammanfattning av Metatech av de analyser som utfördes i studien att en *svår* storm (20 V/km) typiskt förekommer 1 -2 gånger per årionde och att en måttlig storm förekommer ungefär en gång per år.

I sammanfattningen av rapporten anges att de mest betydande riskerna i samband med en GIC är:

- Spänningskollaps
- Transformatorskada
- Felfunktion hos strömtransformatorer
- Felfunktion hos skyddsreläer

Man pekar vidare på att riskerna i samband med en GIC är större än vad man tidigare förväntat sig. Man pekar på att den typ av transformatorer, *3 phase, 5-legged, core type*, som utgör 53% av 400 kV transformatorerna tillhör en av de typer som är mest känslig för GIC. Detta gäller både risken för skada och förbrukning av reaktiv effekt. Man utfärdar följande rekommendationer (ges här i förkortad version, den fullständiga texten finns i [10]):

- Den använda beräknings-/analysmodellen bör verifieras mot fältmätningar och data från övervakningssystem vid OKG och (de som kommer att bli installerade i) Forsmark.
- Man bör besluta sig för vilken GIC-nivå nätet ska klara, och vid vilken belastning.
- Påverkan av GIC på strömtransformatorer ska analyseras.
- Skyddsreläer ska undersökas map. deras känslighet för övertoner (genererade av GIC).

- Beräknings-/analysmodellen bör användas för att utvärdera olika transformatorkonstruktioner lokaliserade på olika ställen i nätet vid upphandling av nya transformatorer. Transformatorer av typerna "single-phase 5-legged non-auto", "autotransformers" (i vissa fall) och "single-phase shell type" ska undvikas så långt som möjligt. Nya transformatorer ska avkrävas tålighet för en föreskriven GIC-nivå. Gamla och nya transformatorer i kritiska lägen i nätet kan behöva förbättrad övervakning. Kritiska transformatorer kan behöva ett föreskrivet gränsvärde för GIC så att dessa på förhand kan kopplas ur på basis av prediktion av kommande GIC-nivå. Man bör vidare analysera olika och kritiska transformatorkonstruktioner.
- Nätkoden ("grid code") ska uppdateras så att den inkluderar viktiga aspekter ur GIC-synpunkt.
- (Anskaffning/utveckling av) prognostjänster ("forecasting services") som innefattar att GIC-nivåer kan bestämmas i nätet och för varje transformator med 45 minuter förvarning. Dessa ska göra det möjligt att agera i förtid för att skydda viktiga transformatorer eller för att bibehålla spänningsstabiliteten. Möjliga ingripanden (bortkoppling av transformatorer, start av MVAR, "rescheduling of outages") ska på förhand identifieras för att bättre motivera kostnaderna för prognoser.

I en rapport från Elforsk från januari 2004 [15], författad av en brett sammansatt arbetsgrupp, redovisas resultatet av en omfattande studie vars mål var att ta fram möjliga och ekonomiskt försvarbara åtgärder för att förhindra störningar pga. geomagnetiska stormar. Bakgrunden var att tidigare arbete visat på relativt stora risker för störning. Åtgärdsförslagen baseras på simuleringar av GIC i det svensk-norska kraftsystemet som utförts med programvaran PowerCast från Metatech i USA. I simuleringarna har den geoelektriska fältstyrkan har satts till 10 V/km. I rapporten presenteras en kostnads- och nyttoanalys utifrån 4 händelser (grundfall):

- Spänningskollaps i hela Sverige
- Spänningskollaps i region av Sverige
- Allvarlig skada på systemtransformator
- Allvarlig skada på aggregattransformator

Slutsatsen av kostnads- och nyttoanalysen är att det finns en stor potential till samhällsekonomisk förbättring genom att vidta åtgärder för att minska risken för GIC-störningar. Man betonar att nyttan är analyserad utifrån ett samhällsekonomiskt perspektiv och att man inte närmare studerat resultatet för anläggningsägarens verksamhet. Kostnaderna för de åtgärder som föreslås, som minskar kostnaderna för en GIC-störning i alla fyra fall med cirka 80%, rör sig om 2 MSEK + 0,5 MSEK/år för vart av de två första fallen ovan (dvs. att man förhindrar spänningskollaps genom att investera i ett förvarningssystem) och 350 kSEK + 10 kSEK per år för vart av de två senare fallen (dvs. att man förhindrar allvarlig skada på

transformator genom att installera mät- och övervakningssystem). I sammanhanget kan noteras att i fallet spänningsskollaps i hela Sverige beräknas kostnaderna vid en GIC-störning pga. införda åtgärder minska från cirka 8 miljarder kronor till 1,6 miljarder kronor.

I rapporten dras följande slutsatser (i förkortad version) om vilka åtgärder som finns och som är tekniskt och ekonomiskt möjliga:

- Man bör utveckla reläskydd som löser respektive transformator då GIC-påverkan blir för stor.
- Man bör investera i ett förvarningssystem. Detta behövs för att kunna genomföra flertalet av de åtgärder som kan tas till för att minska risken för spänningsskollaps.
- Modellering av krafttransformatorers mätningspåverkan skulle möjliggöra framtagning av kravspecifikation för framtida system- och aggregattransformatorer samt även utveckling av reläskydd för transformatorer.
- Att vid upphandling av reläskydd och mättransformatorer ta med krav på immunitet mot GIC.

På basis av dessa slutsatser ger arbetsgruppen följande rekommendationer på fortsatt verksamhet (ett urval av rekommendationerna ges här i förkortad version):

- Utveckling av reläskydd för krafttransformatorer.
- Följa utvecklingsarbetet inom ESA avseende förvarningssystem för att därigenom medverka till att en prototyp tas fram.
- Verifiera ovan använd simuleringsmodell med mätningar (gjorda med magnetometrar och i nollpunkter).
- Utreda om tålighetskrav avseende GIC ska finnas och hur kraven i så fall ska formuleras.
- Medverka till att utreda om ny transformator konstruktion tekniskt och ekonomiskt kan motiveras.

I en annan rapport från Elforsk, daterad juni 2003 [36], som finns i referenslistan till [15], görs en mer fullständig genomgång av själva cost-benefit analysen för de fyra scenarierna i [15]. Också här ansättes det geoelektriska fältet till 10 V/km. Liksom i föregående Elforskrapport dras slutsatsen att det finns en stor potential till samhällsekonomisk förbättring genom att vidta åtgärder för att minska risken för GIC-störningar. En oklarhet är att en del av tabellvärdena skiljer sig mellan [15] och [36] trots att det tycks handla om samma analys. Dessa skillnader har dock ingen betydelse för deras gemensamma slutsats. När det gäller förslag på skyddsåtgärder lyfter man också här fram:

- prognostisering ("early warning system")

och för själva transformatorerna:

- övervakning
- resistans i nollpunkten, samt:
- användning av tåligare typer av transformatorer

Varken i [15] eller i [36] finns något resonemang om sannolikheten att två eller flera transformatorer samtidigt skulle kunna få permanenta skador och, särskilt om andra regioner eller länder drabbas samtidigt, att detta skulle kunna leda till den reservdelsproblematik med risk för långvariga avbrott i eltillförseln som man diskuterat i USA på senare tid, se kapitel 3.1. ovan.

I [37], daterad januari 2004, redovisas resultatet av en inventering av befintliga reaktiva resurser för det svenska elnätet. Resultatet har ställts mot resultaten från studien som rapporterades i [10], se ovan. Utgångspunkten är återigen en *måttlig* geomagnetisk storm, dvs. en geoelektrisk fältstyrka lika med 10 V/km. Man har antagit en driftsituation med hög förbrukning. Den (grova) bedömning som ges är att det svenska systemet normalt har resurser att klara en måttlig (medelsvår) geomagnetisk storm utan speciella åtgärder. Detta under förutsättning att nätet för övrigt är intakt före och under störningen.

De situationer som innebär en stor risk för störning är [15, 37]:

- Mycket hög förbrukning
- Hög överföring med en eller flera generatorer, ledningar, transformatorer eller kondensatorbatterier ur drift
- Mycket svåra geomagnetiska störningar (20 V/km)⁴.

I [15] redovisas information för de transformatorer och ledningar som löste ut i samband med spänningsbortfallet i Malmöregionen den 29 – 30 oktober 2003 då 50 000 kunder i Malmö blev utan el under 20 – 50 minuter. Det rör sig om tre transformatorer, i Östersund, Örebro respektive Norrköping, och 7 ledningar, i Härjedalen, Östergötland, Karlshamn (vid två tillfällen), Malmö, Örebro och Boden.

I [18] redovisas data över magnetfältvariationen och beräknade värden på det geoelektriska fältet i södra Sverige i samband med strömavbrottet i Malmö 2003. Magnetfältvariationer på omkring 400 nT/min, och en beräknad elektrisk fältstyrka lika med 2 V/km redovisas. I rapporten, liksom i [15] redovisas mätningar av GIC för aggregattransformatorn i Oskarshamn 2 (kallas Simpevarp-1 i [18]). Nivåer (absolutbelopp) upp till strax under 200 A noterades. I [18] hävdas att GIC i södra Sveriges 400 kV system spelade en betydande roll för strömavbrottet i Malmö och att

⁴ svarar mot klassificeringen *svår* enligt kapitel 3.4. nedan

detta definitivt orsakades av en felfunktion av ett relä som var alltför känsligt för den tredje övertonen av 50 Hz.

Det kan i sammanhanget noteras att nivån 2 V/km, som enligt terminologin i kapitel 4.3 nedan närmast svarar mot en geomagnetisk på *låg nivå*, alltså orsakade stora problem i Malmö 2003.

En intressant förteckning över incidenter orsakade av GIC mellan åren 1847 och 2004 finns i [12].

3.3.2.3 Påverkan på krafttransformatorer

Halvcykelmättnings av en transformator uppges kunna uppstå redan vid låga nivåer på GIC, i [16] anges 5-10 A, i [19] några Ampère och i [13] några 10-tal Ampère. I [35] anges att mättnings börjar uppträda för spänningar som överstiger 110% till 120% av märkspänningen (*rated voltage*). Det har i sammanhanget nämnts att nya transformatorer ur denna synpunkt skulle vara känsligare än gamla pga. de snävare konstruktionsmarginaler som följer av mer avancerade konstruktionshjälpmedel [15]. Även andra elkraftkomponenter utrustade med järnkärnor, såsom shuntreaktorer och mättransformatorer, kan påverkas av GIC. Shuntreaktorer uppges [35] dock ha en större marginal innan mättnings börjar uppträda. Inte heller mättransformatorer betraktas vara ett stort problem avseende GIC [15, 37].

Halvcykelmättnings leder till en likströmskomponent i transformatorn som i sin tur ger upphov till läckfält, dvs. magnetfält utanför transformator kärnan. Detta träffar andra delar av transformatorn såsom väggar och *core clamping structures* [13,10] varvid virvelströmmar bildas som kan leda till kraftig upphettning. De hotspots som på så sätt genereras kan ge upphov till allvarliga skador på lindningsisolation, förångning av transformatorolja mm. Denna typ av komplexa effekter orsakade av halvcykelmättnings beaktas, enligt [10], i allmänhet inte i konstruktionen av en transformator. Graden av upphettning vid en GIC beror sannolikt både på nivån och också på varaktigheten hos den GIC som exciterar transformatorn samt också på rådande tidskonstanter för bortledning av värme. I [14] rapporteras om att 100 A injicerats i en transformators nollpunkt utan att orsaka permanent skada, en slutsats som framförs i denna rapport är att denna ström skulle behöva ha en varaktighet på åtminstone en timme för att orsaka skada. I [26] har injicering gjorts med 200 A utan att orsaka permanenta skador, det påpekas dock att resultaten inte utesluter att andra typer av transformatorer kan komma att skadas vid denna nivå. I [13] diskuteras den möjliga förekomsten av kumulativa skadeeffekter på lindningsisolation, dvs. en successiv uppbyggnad av en skada orsakad av flera på varandra efterföljande geomagnetiska stormar, alltså ett dos-resonemang. Också i [38] uppges det att GIC kan ge kumulativ degradering av isolationen i aggregattransformatorer ("GSU, Generator Step-Up"). I denna artikel uppges vidare att det som bedömts vara "normala" fel på transformatorer till del kan ha sin orsak i kumulativa effekter av GIC. Denna slutsats grundar sig på att man har visat att såväl en högre felfrekvens som en kortare medeltid mellan fel föreligger på transformatorer som är lokaliserade i regioner som är mer utsatta för GIC än andra regioner. Dessutom har man visat att visat att förekomsten av fel i GSU-

transformatorer har samma typ av variation i tiden som den för geomagnetiska stormar (dock med en tidsfördröjning på ungefär tre år).

I [13] citeras följande faktorer av betydelse för graden av uppvärmning (citater):

- Stray flux magnitude and spectral content
- Magnetic permeability
- Resistivity
- Size of the object (e.g. clamp) perpendicular to the stray flux
- Heat transfer away from the object

Enligt [13] gäller följande gradering gällande påverkan orsakad av halvcykelmättningsmed den typ av transformator som påverkas minst överst och därefter med ökande känslighet:

- three-phase core form–three-leg core
- three-phase core form–five-leg core
- three-phase shell form–conventional core
- three-phase shell form–seven-leg core
- single-phase shell or core form

I [10] anges att transformatorer av typen "three-phase core form–five-leg core" är den näst känsligaste typen av transformator. Den grupp av olika typer av transformatorer man då tycks avse är "Single-phase", "Three-phase shell form", "Three-phase, 3 legged" och "Three-phase, 5 legged". I rapporten konstateras att 53% av 400kV transformatorerna i Sverige är av denna typ.

I [7] görs en beräkning av inverkan, inklusive termiska effekter, av GIC på olika typer av transformatorer som finns i elnätet hos brittiska *National Grid Company*. Utifrån dessa analyser görs en bedömning av risken för frånslagning (*tripping*) p.g.a. gasbildning, se tabellen nedan:

TABLE II
ASSESSMENT OF ACCEPTABLE GIC CURRENT LEVELS AND RISK FOR
DURATION FROM 15 TO 30 MIN

Transformer Core Type, three phase with separate delta and steel tank	GIC Current amperes/ phase .				
	5	10	25	50	100
3 limb no core bolts.	Non	Lo.	Lo.	Lo.	Pos.
3 Limb + core bolts in limbs & yokes.	Lo.	Lo.	Lo.	Lo.	Pos.
5 limb no core bolts in yokes or limbs.	Lo.	Lo.	Lo.	Pos.	Hi.
5 limb + core bolts in yokes & limbs.	Lo.	Pos.	Pos.	Pos.	Hi.
3 off bank single phase, no core bolts yokes or limbs.	Lo.	Lo.	Pos.	Pos.	Hi
3 off bank single phase + core bolts in main and return limbs.	Lo.	Pos.	Hi.	Hi.	Hi

Tabell 1. Från [7].

Publicerade data över svenska analyser av verkan på transformatorer tycks vara sparsamma. Ett exempel på en sådan analys finns i [39], där man konstaterar att de (då) tillgängliga beräkningsprogrammen (finita element metoden) kommer till korta. FoU inom området numeriska analyser av verkan på transformatorer bedrivs på ABB, KTH och LTH.

Rapporter om permanenta skador på krafttransformatorer är sällsynta. Utöver de publicerade beskrivningarna av skadorna på de s.k. Salem-1 transformatorerna i New Jersey, som erhöll omfattande och permanenta skador i samband med spänningskollapsen i Quebec 1989, har det rapporterats att 15 transformatorer i Sydafrika skadades i samband med den geomagnetiska stormen i oktober 2003, se [20, 41]. Ytterligare information om detta har dock inte gått att få. I [10] anges att ungefär 10 transformatorer har skadats ("failed violently") sett över hela världen, varav 2 i England. Vidare uppges att livstiden har visat sig vara kortare för transformatorer i "GIC-känsliga" områden.

En rapport över skador och händelseförlopp för transformatorerna tillhörande kärnkraftreaktorn Salem-1 i New Jersey finns i [17]. Där berättas att man sju respektive 10 dagar efter den geomagnetiska stormen, som inträffade den 13 mars 1989, detekterade höga nivåer av förbränningsgaser i transformatorerna, varvid dessa togs ur bruk och undersöktes (dessa var av typen *single-phase, shell form*). Man konstaterar också att dessa transformatorer, liksom andra samlokaliserade transformatorer tillhörande två andra kärnkraftreaktorer, genom sin excellenta

jordning via ett stort antal 30 meters stålstöttor (dessa transformatorer är/var placerade på en konstgjord ö i en träskartad miljö), och genom läget nära Atlanten samt markens (i djupare lager) höga resistivitet, erbjöd en perfekt ingångsväg för GIC. Inspektionen visade på allvarliga skador avseende "severely thermally degraded insulation", och metallskador på lindningarna: "damage varied from melted and fused strands, to large melted masses of copper and copper shot". Slutsatsen av inspektionen var att GIC hade spelat en avgörande roll för uppkomsten av skadorna. Man konstaterade att den mest markanta effekten på transformatorerna var den enorma ökningen av magnetiseringsströmmen. Denna beräknades uppgå till en ökning av strömmen på lågspänningssidan lika med 50-75%. Orsaken till skadorna antogs bero på en kombination av förhöjda virvelströmsförluster och en ojämn ("uneven") fördelning av den ökade magnetiseringsströmmen. Man uppskattade strömmen i neutralledaren till 224 A (dvs. 74.7 A per fas).

Ovanstående nivå på GIC i nollpunkten kan jämföras med de runt 300 A som mättes upp april 2000 i transformatorn Simpevarp-2 nära Oskarshamn. I [10] redovisas beräkningar på samma transformator (kallas i rapporten Simpevarp T₃) för den geomagnetiska storm som inträffade 13 mars 1989, strömmen beräknades i detta fall till hela 1230 A (den geoelektriska fältstyrkan beräknades till 14 V/km).

I rapporten om haveriet i Quebec [17] berättas också att man vid en senare geomagnetisk storm av lägre intensitet den 19 september 1989 erhöll liknande, men mindre, skador på en av transformatorerna tillhörande Salem-2 reaktorn. Fotografier på de förstörda transformatorerna finns i [12] och på hemsidorna [23] och [24].

3.3.2.4 Skyddsåtgärder

I [13] ges en översikt av åtgärder för att lindra konsekvenserna av geomagnetiska stormar på elkraftnät. I rapporten nämns (förkortat och fritt översatt):

- Blockering av GIC. Genom användning av seriekapacitanser som appliceras i transformatorers nollpunkter eller i transmissionsledningar. Det senare finns exempel på i Kanada. För komplett skydd med denna metod behövs fullständig applicering eftersom GIC annars bara styrs om från en del av elsystemet till en annan.
- Operatörsföreskrifter. Bygger på att man har ett tillförlitligt system för prognos av GIC. Här nämns exempelvis att minska belastningen på, eller koppla bort viktiga transformatorer och olika sätt att öka tillgången på reaktiv effekt.
- Beredskap och ökad robusthet mot GIC. Här nämns systemstudier för att fastlägga systemets sårbarhet mot GIC, grundläggande konstruktionsaspekter och val av tåliga komponenter såsom lämpliga typer av transformatorer.
- Övervakning, t.ex. mätning av störningar i det jordmagnetiska fältet, mätning av GIC i transmissionsledningar och transformatorers nollpunkter och mätning av övertoner och flöde av reaktiv effekt.

- Prognostisering av geomagnetiska stormar. Idealet vore att med minst en timmes förvarning få information om när stormen börjar och slutar, relevanta parametrar som beskriver dess styrka, vilka regioner som kommer att drabbas och osäkerheten i prognosen. Idag befintliga⁵ prognosystem kan bara ge larm vid den tidpunkt då den geomagnetiska stormen börjar⁶. Den stora förbättringen förväntas ske då data om solvinden kan fås från satelliten ACE, som sköts upp 1997, eftersom detta skulle innebära att förvarningstiden skulle bli omkring en timme.

Kommentar: På NASA:s hemsida [42] uppges att man nu har ett experimentellt system för prognos av GIC, *Solar Shield*, igång som baserar sig både på registrering av CME från solen, vilket ger en indikation om att geomagnetiska stormar kan komma att inträffa om 2 -4 dagar, och på data om solvinden från ACE-satelliten. ACE-satelliten ligger alltid mitt emellan solen och jorden i en s.k. Lagrangepunkt, på ett avstånd ungefär lika med 1 miljon engelska mil, dvs. cirka 1.6 miljon km. Ett EU-program med samma syfte, EURISGIC, se [43] har nyligen startats. Mer information om detta ges på sidan 20.

Också i [44] diskuteras blockering eller minskning av GIC i transformatorer i form av en seriekapacitans respektive en lågohmig resistans i nollpunkten. Medan användning av seriekapacitans avfärdas, pga. av att det inte räcker att på så sätt skydda de mest exponerade transformatorerna, så ges en positiv bild av metoden med serieresistans.

I [15] nämns även tänkbara åtgärder i form av en frånskiljare i transformatorns nollpunkt som öppnar vid GIC (men man pekar på problematiken hur man ska kunna veta då den ska slutas igen) och reläskydd som löser respektive transformator på basis av mätning i nollpunkten (men man pekar på att det troligen är svårt att stämma av skyddet för alla olika transformatorkonstruktioner).

Motstånd i transformators nollpunkt infördes i slutet av 2000 då en 5 Ohms resistans installerades i Simpevarp T3 transformatorns nollpunkt som skydd mot GIC [10, 5]

När det gäller skydd av transformatorer från mättnings genom ändringar konstruktionen av själva transformatorn har Mats Alaküla och Sture Lindahl patenterat en transformator med kompensationslindning som är effektiv, se [45, 12]. I [45] visas att metoden också kan tillämpas på autotransformatorer, i rapporten föreslås fortsatt arbete som bl.a. innefattar experimentellt arbete för att validera och/eller förbättra simuleringsmodellen.

Det har framförts att eftersom den 2:a övertonen är en mått på styrkan av GIC skulle denna vara intressant att detektera, se [35].

⁵ Observera att den refererade artikeln är från 2002

⁶ Som illustration om att denna typ av förvarning inte räcker ges i [38] där det framgår att den händelsekedja, orsakad av GIC, som orsakade det 9 timmar långa strömavbrottet inleddes bara 1,5 minuter före avbrottet.

Som beskrivits ovan, kap. 3.3.2.1.1, så bedrevs en omfattande Elforsk-studie [15] vars mål var att ta fram möjliga och ekonomiskt försvarbara åtgärder för att förhindra störningar pga. solstormar. Slutsatserna (i förkortad version) om vilka åtgärder som finns och som är tekniskt och ekonomiskt möjliga repeteras nedan:

- Man bör utveckla reläskydd som löser respektive transformator då GIC-påverkan blir för stor.
- Man bör investera i ett förvarningssystem. Detta behövs för att kunna genomföra flertalet av de åtgärder som kan tas till för att minska risken för spänningskollaps.
- Modellering av krafttransformatorers mätningspåverkan skulle möjliggöra framtagning av kravspecifikation för framtida system- och aggregattransformatorer samt även utveckling av reläskydd för transformatorer.
- Att vid upphandling av reläskydd och mättransformatorer ta med krav på immunitet mot GIC.

I sammanhanget kan påpekas att det numera finns vissa krav avseende tålighet mot likström i nollpunkten på nya transformatorer, utfärdade av Svenska Kraftnät 2010, se [50].

Som också framgått ovan i kap. 3.3.2.2 så föreslår man i [36] skyddsåtgärder i form av prognostisering ("early warning system") och för transformatorer övervakning, resistans i nollpunkten samt användning av tåligare typer av transformatorer.

I rapporten [16] från Svenska Kraftnät hävdas att skydd av det svenska och norska kraftnätet genom att helt och hållet förhindra att GIC tar sig in i kraftnätet inte är en framkomlig väg. Man hävdar vidare att övervakning av GIC i kraftnätet inte heller är en framkomlig väg bl.a. eftersom den inte ger en tillräckligt lång "lead-time" för att man ska kunna sätta in åtgärder mot plötsliga svåra transienter och att det kan leda till onödiga försiktighetsåtgärder. Den metod man förespråkar är istället prognostisering, vilket skulle ge nätoperatörerna en tillräckligt lång tid att agera.

Som nämnts ovan så beskrivs i [42] ett prognosystem som kallas *Solar Shield*. Systemet kommer att aktiveras då man upptäckt en CME (koronamassutkastning) från solen (det tar 24 – 48 timmar innan denna CME når jorden). Man kommer då att starta förberedelserna för att beräkna GIC. När CME:n passerar satelliten ACE, belägen 1,6 miljoner km från jorden görs mätningar av dess hastighet, densitet och magnetfält. På grundval av dessa data kan detaljerade beräkningar av GIC göras varefter ett larm kan gå ut. *Solar Shield* är än så länge på experimentstadiet och har ännu inte utvärderats vid en geomagnetisk storm.

Ett treårigt EU-projekt med samma syfte, EURISGIC se [43], har nyligen startats (den 1 mars 2011). I beskrivningen anges att projektet: "will produce the first European-wide real-time prototype forecast service of GIC in power systems, based on in-situ solar wind observations and comprehensive simulations of the Earth's

magnetosphere. By utilising geomagnetic recordings, we will also derive the first map of the statistical risk of large GIC throughout Europe. Because the most intense geomagnetic storms constitute the most remarkable threat, with a risk of power grid blackouts and destruction of transformers, we will also investigate worst-case GIC scenarios based on historical data. ”Projektkonsortiet består av totalt 7 deltagare, varav följande tre från de nordiska länderna: Finnish Meteorological Institute (FMI), NeuroSpace (Sverige) och Institutet för Rymdfysik (IRF).

3.3.2.5 Verksamheter inom GIC i Sverige

Denna utredning, som inte gör anspråk på fullständighet, har underlättats genom mycket generöst stöd från experter (främst) inom landet. Det kan konstateras att det tidigare bedrivits mycket kvalificerade och tidvis ganska omfattande verksamheter av aktörer inom elbranschen när det gäller påverkan på kraftnätet och också mycket kvalificerade vetenskapliga aktiviteter inom UoH. Huvudsakliga aktörer inom landet synes vara följande:

- Forskning inom rymdväder bedrivs vid Institutet för Rymdfysik, IRF (Lund/Uppsala/Kiruna), vid KTH och vid Luleå Tekniska Universitet.
- Utveckling av numeriska metoder för beräkningar av GIC på kraftledningar bedrivs vid IRF och företaget NeuroSpace i Lund. Åtskilligt arbete har gjort i samarbete med *Finnish Meteorological Institute* i Finland, som har bedrivit framstående verksamhet inom såväl rymdväder som GIC sedan 1980-talet).
- Analyser av verkan av GIC på elkraftsystemet och dess komponenter, utformning av skydd mm. har genomförts av Svenska Kraftnät, Elforsk, E.ON, Lund Tekniska Högskola, Gothia Power AB m.fl.
- FoU avseende verkan på och skydd av transformatorer bedrivs vid ABB, KTH, se t.ex.[46] och LTH, se t.ex. [40, 45].

3.3.3 Effekter av GIC på järnvägssystem

För järnvägen har endast ett fåtal problem som tillskrivs geomagnetiska stormar rapporterats [18]. Vid den geomagnetiska stormen i Sverige i juli 1982 erhöles signalfel pga. att den i marken inducerade spänningen motverkade den likspänning som finns mellan rälererna för att detektera om ett tåg finns på rälsen [47]. Signalsystemet uppfattade alltså det på så sätt skapade spänningsfallet som att tåg befanns sig på utsatta spåravsnitt varvid signalsystemet slog om till rött. Från Ryssland finns några rapporter om liknande problem [48, 49].

3.3.4 Effekter av GIC på telekommunikationssystem

För telekommunikationssystem tycks problem i samband med geomagnetiska stormar vara ganska obetydliga. I den förteckning över incidenter orsakade av GIC mellan åren 1847 och 2004 som finns i [8, 12] rör problemen fram till 1938 nästan uteslutande telegrafsystem medan uppgifter om störningar av telesystem helt saknas efter detta. Vid en geomagnetisk storm i Sverige 1921 bröt eldsvådor ut vid flera telestationer [8]. I samband med den geomagnetiska stormen i Sverige i juli 1982 rapporterades att ett s.k. åskskyddskol brann upp [47]. Det bör påpekas att elkraftdistributionen är beroende av olika typer av kommunikationssystem via kabel, radio, satellit och fiberoptik (det senare okänsligt för verkan av geomagnetiska stormar) [8]. Det kan i

sammanhanget noteras att det rapporterats att telekommunikationerna fungerade utan problem under den geomagnetiska stormen i Quebec 1989 [17].

3.3.5 Effekter av GIC på pipelines

Som nämnts i inledningen kan GIC på pipelines orsaka problem med korrosion, och också problem med system som ska övervaka att korrosion förhindras [8]. För att minska risken för korrosion lägger man pipeline på en negativ potential relativt marken. Enligt uppgift består verkan av GIC på pipelines i att GIC orsakar variationer i denna potentialskillnad som finns mellan pipeline och mark varvid korrosion kan uppstå. GIC innebär inte en risk för fel av katastrofal karaktär men en förkortning av dess livstid

3.4 Geomagnetiskt inducerade strömmar (GIC), förslag på verksamheter

Nedan lämnas fem förslag på verksamheter. En utgångspunkt, baserat på de ekonomiska begränsningar som självfallet föreligger, är att ett av dessa förslag väljs. De fyra första förslagen betraktas preliminärt ha högre prioritet än det sista, när det gäller förslag 4 kan man förmodligen avvakta med att starta av en eventuell verksamhet, eftersom denna kommer att bygga på resultaten från ett EU-projekt som kommer att avslutas först 2014 .

Det första förslaget innebär att man genomför (ett urval av) de rekommendationer som tidigare inhemska studier resulterat i.

Förslagen 2 och 3 innebär att man gör en uppdatering av den studie över sårbarhet och skyddsåtgärder som rapporterades 2000 [10]. I denna studie skall de nya 400 kV ledningsdragningar som nu är beslutade tas med och förslagsvis även de som planeras. I förslag 2 utförs analyserna med hjälp av det amerikanska simuleringsverktyg som använts i den tidigare studien medan förslag 3 istället bygger på att en vidareutveckling av en liknande svensk beräkningskod utförs, varefter denna används för att genomföra analyserna.

Eftersom ett val mellan de förslag 2 och förslag 3 inte enbart, och kanske inte ens i huvudsak, kan göras utifrån tekniska utgångspunkter utan snarare från "politiska" sådana, har ingen prioritering gjorts mellan dessa förslag. Förslag nr. 3 avser alltså att utföra samma slags analyser som förslag nr. 2, men med hjälp av en beräkningskod som utvecklas/utvecklats av IRF m.fl. Denna kod innefattar i nuläget inte det svensk-norska kraftnätet varför förslag 3 bedöms bli avsevärt dyrare att genomföra än förslag 2. Mervärdet i att välja förslag 3 är att man, förutom resultatet av analysen av kraftnätets sårbarhet, får ett nationellt analysverktyg för framtida verksamheter. Det kan noteras att utvecklingen av en nationell beräkningskod, dvs. förslag 3, är snarlikt det som föreslås i förslag 4. Om man vill ha en snabb analys av kraftnätets sårbarhet skulle man alltså kunna välja förslag 2 och därefter, då EU-projektet är avslutat i mars 2014, utföra en uppbyggnad av en nationell kod i form av förslag 4.

En aspekt som bör övervägas när det gäller förslagen 2 och 3 är om särskild vikt ska läggas på att bedöma om en *extrem* storm ("hundraårsstormen") kan leda till mycket

långvariga stillestånd beroende på att ett stort antal krafttransformatorer kan komma att skadas, jfr den diskussion som förs i USA och som refereras i kapitel 3.1 ovan. Ett val mellan förslagen 2 och 3 bör göras av en referensgrupp bestående av både teknisk/vetenskaplig expertis från GIC-områdets olika discipliner och av personer ansvariga för samhällets säkerhet.

Förslag 4 avser finansiering av en fortsättning på det EU-projekt avseende prognostisering av GIC som Sverige medverkar i. Förslaget går ut på att man tar steget från prototyp till ett färdigt analysverktyg för det svenska kraftnätet.

Förslag 5 innebär att man utvecklar ett analysverktyg liknande de som används och föreslås i förslagen 2, 3 och 4 ovan, men i detta fall för järnvägen.

Förslag 1.

Mål: att utvärdera och genomföra aktiviteter som föreslagits i tidigare svenska studier.

En studie genomförs som syftar till att ta fram ett konkret underlag med syftet att därefter genomföra aktiviteter som föreslagits i tidigare svenska studier, se kapitel 3.3.2.2 och 3.3.2.4 ovan. Verksamheten inleds lämpligtvis med att man gör en prioriteringslista baserad på de förslag som tidigare redovisats och klarlägger vilka aktiviteter (t.ex. i termer av FoU) och kostnader som ingår för varje delmoment. I den mån resurserna medger så ska denna inledande studie följas av att åtgärderna genomförs i linje med de prioriteringar som gjorts tidigare.

Förslag 2.

Mål: att genomföra en uppdatering av den studie över sårbarhet och skyddsåtgärder som rapporterades 2000, förslagsvis kompletterad med fallet *extrem* geomagnetisk storm. Analyserna genomförs med samma beräkningskod tidigare använt (från Metatech, USA).

Avsikten med detta förslag är att genomföra en uppdatering av den studie över sårbarhet och skyddsåtgärder som rapporterades 2000 [10]. I denna skall de nya 400 kV ledningsdragningar som nu är beslutade tas med och förslagsvis även de som planeras.

Den tidigare studien genomfördes med ett hotbildscenario som bestod av tre nivåer av den påkänning som orsakas av en geomagnetisk storm, nämligen:

- Geomagnetisk storm vid *låg nivå*: $E=1$ V/km
- *Måttlig* geomagnetisk storm: $E=10$ V/km (uppträder, enligt [10] 1 -2 gånger per decennium. Enligt [16] uppträder den dock ungefär en gång per år).
- *Svår* geomagnetisk storm: $E=20$ V/km (uppträder, enligt [16], typiskt 1 -2 gånger per decennium).

Om så bedöms vara av intresse skulle dessa nivåer kunna kompletteras med påkänningen från en elektrisk fältstyrka svarande mot en *extrem* geomagnetisk

storm (inträffar statistiskt sett en gång per århundrade). Som framgår av definitionerna i punktsatserna ovan, och vad som refereras i kapitel 3.1 och 3.3.2.2 ovan, så tycks det finnas en osäkerhet om huruvida 20 V/km svarar mot tioårs- eller hundraårsstormen. Man ska dock hålla i minnet att den geoelektriska fältstyrkan beror av de geologiska förhållandena varför denna fältstyrka, för ett givet värde på dB/dt , kan skilja sig mellan olika regioner. Av denna orsak torde det vara bättre att definiera de olika nivåerna av en geomagnetisk storm i termer av dB/dt . I [21, s. 1-30] anges t.ex. $dB/dt = 5000nT / \text{min}$ som ett *extremt* värde på dB/dt . Viktigt att notera är också att det inte bara är (topp)värdet på den geoelektriska fältstyrkan som definierar graden av påkänning utan också t.ex. varaktigheten i påkänningen, jfr. kapitel 3.3.2.3 ovan. dB/dt och därmed den geoelektriska fältstyrkan, och andra relevanta parametrar, för fallet *extrem* geomagnetisk storm måste alltså inledningsvis definieras för svenska förhållanden. Om detta extrema scenario väljs att studeras, och kanske även för fallet *svår* geomagnetisk storm, kan det vara av särskilt intresse att studera risken för samtidigt permanenta skador hos flera transformatorer under en och samma storm. Motivet är att allvarliga skador som inträffar samtidigt för ett större antal transformatorer (i Sverige och utomlands) skulle kunna leda till mycket långvariga avbrott, jfr. de oro som har luftats för detta scenario, av karaktären *low-frequency, high -impact*, i USA och som beskrivs i kapitel 3.1 ovan. En meningsfull analys av konsekvenserna av 100-årsstormen torde alltså förutsätta att man med någotsånär hög säkerhet kan säga hur många krafttransformatorer som kommer att skadas permanent. För att kunna uppnå en sådan säkerhet bör en bedömning göras om nuvarande klassificering av transformatorers känslighet mot GIC ur aspekten permanent skada är tillfylles eller om denna klassificering behöver kompletteras med mer ingående analyser och forskning avseende skadeeffekter i transformatorer. I en sådan verksamhet bör också analyser av kumulativa skadeeffekter inkluderas, jfr. kapitel 3.3.2.3 ovan.

I den tidigare studien, som gjorde i samverkan med Metatech, USA, användes ett programpaket för beräkningar, *Power Cast*, som utvecklats av Metatech. Detta innebär att det svensk-norska kraftnätet redan finns inlagt i detta program men att en uppdatering behöver ske för att inkludera de nya delarna av ledningsnätet.

Ovanstående studie skulle, förutom den information den ger om sårbarhet för det uppdaterade kraftnätet, också ge underlag för vilka områden som fordrar fördjupade studier och forskning, jfr. de rekommendationer som föreslogs i [10]. En viktig del i detta kunde vara att, för de olika hotnivåerna, dvs. *måttlig*, *svår* respektive *extrem* geomagnetisk storm, bestämma vad som är en acceptabel påverkan på elkraftsystemet. För den låga och måttliga hotnivån skulle det t.ex. kunna handla om kravet att full funktion bibehålls under och efter stormen, för den extrema hotnivån att man kanske accepterar ett relativt omfattande spänningsbortfall just i samband med stormen och kanske också partiellt bortfall under en viss period efteråt (veckor, månader?).

Fördjupade studier skulle som nämnts ovan också t.ex. kunna gälla, om behovet visar sig finnas, en förfining över den klassificering av tålighet som finns för olika

typer av transformatorer, jfr. kapitel 3.3.2.3 ovan. En sådan skulle kunna göras med de förbättrade beräknings- och analysverktyg som finns i industrin och vid UoH.

Förslag 3.

Mål: att genomföra en uppdatering av den studie över sårbarhet och skyddsåtgärder som rapporterades 2000, eventuellt kompletterad med fallet *extrem* geomagnetisk storm. Analyserna genomförs med hjälp av en vidareutveckling av en beräkningskod som utvecklats av IRF (Lund) m.fl.

Samma studie som föreslås i förslaget 2 ovan skulle kunna utföras på basis av den beräkningskod som utvecklats av IRF m.fl. Detta betyder bl.a. att det svensk-norska elnätet behöver läggas in i denna kod, vilket sannolikt innebär ett mycket omfattande arbete. Värdet av denna merkostnad dvs. att man bygger upp en nationell beräkningskod, jämfört med kostnaden för förslag 2 ovan, måste väsentligen bedömas utifrån andra utgångspunkter än de tekniskt/vetenskapliga. Notera att förslag 3 har en koppling till förslaget 4 nedan.

Förslag 4.

Mål: att utifrån resultatet av EU-projektet EURISGIC skapa ett för elkraftoperatörerna användbart verktyg för prognostisering av GIC för det svensk-norska elnätet. (EU-projektet avslutas i mars 2014).

Som framgått ovan så deltar Sverige (IRF, NeuroSpace) i EU/FP7-projektet EURISGIC, som startade den 1 mars 2011 och som ska pågå under tre år. Projektet har som ett mål att ta fram en prototyp av ett verktyg för prognostisering i realtid av GIC. Syftet med EU-projektet är alltså att leverera en prototyp, det ingår alltså inte i projektet att leverera ett färdigt verktyg i vilket (t.ex.) det svensk-norska elnätet är inlagt. En lämplig fortsättning på EU-projektet vore att anslå medel till att utifrån resultatet av EU-projektet skapa ett för elkraftoperatörerna användbart verktyg för prognostisering av GIC för det svensk-norska elnätet. Processen för att göra detta är snarlik den som föreslås som en del i förslaget 3 ovan.

Förslag 5.

Mål: att skapa ett beräkningsverktyg för att analysera verkan av geomagnetiska stormar på det svenska järnvägssystemet.

På liknande sätt som för förslaget 3 (och förslaget 4) ovan skapa ett beräkningsverktyg för att analysera verkan av geomagnetiska stormar men i detta fall på järnvägens system. Inledande kontakter på teknisk nivå med medarbetare på Trafikverket om detta har bemötts med stort intresse. Trafikverket, tidigare Banverket, har under många år finansierat forskning om åskans verkningar och skydd vid UoH varför omfattande kunskaper redan finns om järnvägens tekniska system och dess respons vid extrema elektromagnetiska påkänningar.

4 Erkännande

Många har varit behjälpliga med att bidra med underlag och idéer, av vilka författaren särskilt vill nämna följande personer: Göran Engdahl, KTH; Göran Eriksson, ABB Corporate Research; Thomas Granlund, Saab; Sven Jansson, Elforsk;

Tomas Karlsson, KTH; Bertil Kielén, Svenska Kraftnät; Sture Lindahl, Gothia Power; Daniel Månsson, KTH; Risto Pirjola, Finnish Meteorological Institute; William Radasky, Metatech; Håkan Swahn, E.ON; Ari Viljanen, Finnish Meteorological Institute och Magnus Wik, Neurospace.

5 Referenser och litteratur

- [1]. Projektplan – ansökan om medel. ”Skydd mot elektromagnetiska risker”. Elsäkerhetsverket, 2010-09-29, justerat 2011-02-02.
- [2]. Diskussioner med Elsäkerhetsverket tekniske direktör Horst Blüchert 2011-03-24.
- [3]. Lui, A. T. Y., ”Tutorial on Geomagnetic Storms and Substorms”, IEEE Trans on Plasma Science, Vol. 28, No. 6, December 2000, pp.1854 – 1866.
- [4]. Wik M., ”Störningar i system kan bero på dåligt rymdväder”, Elektronik I Norden, nr. 13, 2007, s. 42-46.
- [5]. Wik M., et al., ”Calculation of geomagnetically induced currents in the 400 kV power grid in southern Sweden”, Space Weather, Vol. 6, S07005, 2008, American Geophysical Union.
- [6]. Pirjola R., ”Calculation of Geomagnetically induced currents (GIC) in a high-voltage electric power transmission system and estimation of effects of overhead shield wires on GIC modelling”, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 69 (2007), pp. 1305-1311.
- [7]. Price P. R., ”Geomagnetically Induced Current Effects on Transformers”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No. 4, October 2002.
- [8]. Boteler D. H. et al., ”The Effects of Geomagnetic Disturbances on Electrical Systems at the Earth’s Surface”, Adv. Space Res., Vol. 22, No. 1, pp. 17-27, 1998.
- [9]. Molinski T. S. et al., ”Shielding Grids from Solar Storms”, IEEE Spectrum, November 2000, pp. 55-60.
- [10]. Swahn H. och Kielén B., ”Final Report – Evaluation of the Vulnerability of the Swedish Transmission Network to the Effects of Geomagnetic Storms”, Svenska Kraftnät Rapport, Subject 116743, 2001-04-11.
- [11]. Baker D.N., ”Effects of Hostile Space Weather on Satellite Operations”, Proc. 2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Long Beach, USA, August 14-19 2011, p. 306-311.

- [12]. Andréasson K., "Transformatorers dimensionering med avseende på geomagnetiskt inducerad ström i kraftsystemet", examensarbete 2006:147 CIV, Luleå Tekniska Universitet, 2006.
- [13]. Molinski T. S., "Why utilities respect geomagnetically induced currents", Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 64 (2002), pp. 1767 – 1778.
- [14]. Pirjola R., "Induction in Power Transmission Lines During Geomagnetically Disturbances", Space Science Reviews 35 (1983), pp. 185 – 193, 1983.
- [15]. "Solstormar. Transienta geomagnetiska störningar", Elforsk rapport 03:33, januari 2004. www.elforsk.se.
- [16]. "Executive Summary", Metatech Corporation, USA, år 2000 (?). Källa: Bertil Kielén, Svenska Kraftnät.
- [17]. "NERC System Disturbance Analysis: 1989 Geomagnetic Storm". August 1990. <http://www.nerc.com/files/1989-Quebec-Disturbance.pdf>.
- [18]. Wik M. et al., "Space weather events in July 1982 and October 2003 and the effects of Geomagnetically induced currents on the Swedish technical systems", Ann. Geophys., 27, 1775 – 1787, 2009.
- [19]. Kappenman J. G., et al., "Advanced Geomagnetic Storm Forecasting: A Risk Management Tool for Electric Power System Operations", IEEE Trans. on Plasma Science, Vol. 28, No. 6, December 2000.
- [20]. "High-Impact, Low-Frequency Event Risk to the North American Bulk Power System", NERC – North American Electric Reliability Corporation, June 2010, www.nerc.com.
- [21]. Kappenman J., "Geomagnetic Storms and Their Impacts on the U.S. Power Grid, Metatech report Meta-R-319, January 2010, Metatech Corporation, USA.
- [22]. Radasky W. A., "High Power Electromagnetic (HPEM) Threats to the Smart Grid", Interference Technology, EMC Directory and Design Guide 2011, pp. 46-55, 2011.
- [23]. http://www.lund.irf.se/gic/gichome/gic_intro.html
- [24]. http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2010/26oct_solarshield/
- [25]. Pulkkinen A., et al., "Geomagnetic storm of 29-30 October 2003: Geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish high-voltage power transmission system", Space Weather, Vol. 3, So8C03, 2005, American Geophysical Union.

- [26]. Lahtinen M. and Elovaara, "GIC Occurrences and GIC Test for 400 kV System Transformer", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 17, No. 2, April 2002, pp. 555-561.
- [27]. H.R.668 - SHIELD Act. To amend the Federal Power Act to protect the bulk-power system and electric infrastructure critical to the defense and well-being of the United States against natural and manmade electromagnetic pulse ("EMP") threats and vulnerabilities.
<http://www.opencongress.org/bill/112-h668/show>.
- [28]. Lindström S., Waldenvik M., "Rymdväder – effekter på militära och civila system", FOI rapport nr. FOI-R—1464—SE, december 2004. Totalförsvarets Forskningsinstitut – FOI, 172 90 Stockholm.
- [29]. Johansson B. och Asp B., "Scenariobaserad operativ värdering av rymdvädereffekter - Trådlös kommunikation och GPS", FOI-RH--0934—SE, december 2009. Totalförsvarets Forskningsinstitut – FOI, 172 90 Stockholm.
- [30]. Granlund T., "Guideline for designing and integration of Avionics concerning atmospheric radiation", Saab report no. LC-09:0026-04, 2011-06-15
- [31]. Kader R., Granlund T., "Är den kosmiska strålningen ett hot mot dagens elektronik?", Electronic Environment 2011, Stockholm, 5-6- april 2011.
- [32]. <http://fp7-spacecast.eu/>
- [33]. Dayton L., "Solar storms halt stock market as computer crasch", New Scientist, September 9, 1989.
- [34]. "Single Event Radiation Effects in Electronics: A Design Guide", The SEEDER Consortium, first edition, 2010. <http://seeder.org.uk>.
- [35]. Lindahl S., "Effects of geomagnetically induced currents on protection systems", Elforsk rapport 03:34, 2003-12-21. www.elforsk.se.
- [36]. Skarp S., "Cost-benefit analysis of measures against power grid disturbances caused by solar storms", Elforsk rapport 03:36, juni 2004. www.elforsk.se.
- [37]. Kielén B., "Geomagnetiskt inducerade strömmar, GIC. Mvar-behov och resurser", Elforsk rapport 03:37, januari 2004. www.elforsk.se.
- [38]. Kappenman J. G., "Geomagnetic Storms and Their Impact on Power Systems", IEEE Power Engineering Review, May 1996, pp. 5-10.
- [39]. Karlsson P., "DC-magnetisering av generator-transformatorer", Elforsk rapport 03:35, december 2003. www.elforsk.se.
- [41]. Kappenman J., "An overview of the impulsive geomagnetic field disturbances and power grid impacts associated with the violent Sun-Earth connection

event of 29 – 31 October 2003 and a comparative evaluation with other contemporary storms”, Space Weather, Vol. 3, So8C01, 2005.

- [42]. http://ccmc.gsfc.nasa.gov/Solar_Shield/Solar_Shield.html
- [43]. <http://www.eurisgic.eu/>
- [44]. Kappenman J., “Low-Frequency Protection Concepts for the Electric Power Grid: Geomagnetically Induced Current (GIC) and E₃ HEMP mitigation”, Metatech report Meta-R-322, Metatech Corporation, USA, January 2010.
- [45]. Samuelsson O., ”Autotransformator okänslig för GIS”, Elforsk rapport 10:43, december 2009. www.elforsk.se.
- [46]. Mousavi S. A., Engdahl G. and Agheb E., “Investigation of GIC effects on core losses in single phase power transformers”, Archives of Electrical Engineering, Vol. 60(1), pp. 35 – 47, 2011.
- [47]. Wallerius A., “Solen gav Sverige en strömstöt”, Ny teknik – Teknisk tidskrift, 1982:29.
- [48]. Ptitsyna N.G., et al., “Do Natural Magnetic Fields Disturb Railway Telemetry?”, Proc. of 7-th Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, June 26 – 29, 2007, Saint-Petersburg, Russia.
- [49]. Belov A. V., et al., “Effects of Strong Geomagnetic Storms on Northern Railways in Russia”, Proc. of 7-th Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, June 26 – 29, 2007, Saint-Petersburg, Russia.
- [50]. “Power Transformers 2 MVA and Above”, Teknisk Riktlinje, TR1-10E, Version E, Svenska Kraftnät, 2010-11-08.
- [51]. Radasky W. A., ”Overview of the Impact of Intense Geomagnetic Storms on the U.S. High Voltage Power Grid”, Proc. 2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Long Beach, USA, August 14-19 2011, p. 300-305.
- [51]. Pirjola R., “Estimation of the Electric Field on the Earth’s Surface During a Geomagnetic Storm”, Geophysica (1984), Vol. 20, No. 2, pp.89-103, 1984.
- [52]. Pirjola R., “On Currents Induced in Power Transmission Systems During Geomagnetic Variations”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-104, No. 10, October 1985.
- [53]. “Managing Critical Disasters in the Transatlantic Domain – The Case of a Geomagnetic Storm”, Workshop Summary, February 23-24, 2010, Boulder, CO, USA. The Federal Emergency Management Agency (FEMA), Department of Homeland Security.

- [54]. Pirjola R. J., Viljanen A. T. and Pulkkinen A. A., "Research of Geomagnetically Induced Currents (GIC) in Finland", Proc. of 7-th Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, June 26 – 29, 2007, Saint-Petersburg, Russia.
- [55]. Kolawole J., Mulukulta S., "Effects of Geomagnetic-Induced-Current on Power Grids and Communication Systems: a Review", Proc. of the Twenty-Second Annual North American Power Symposium, 1990.
- [56]. Lundstedt H., et al., "Real-Time Forecast service for Geomagnetically Induced Currents. Executive Summary", ESA/ESTEC Contract Number 16953/02/NL/LvH. www.esa.int.
- [57]. Lehtinen M och Pirjola R., "Currents produced in earthed conductor networks by geomagnetically-induced electric fields", Annales Geophysicae, 1985, 3, 4, pp. 479-484.
- [58]. Pirjola R., "Review on the calculation of surface electric and magnetic fields and of geomagnetically induced currents in ground-based technological systems", Surveys in Geophysics 23: 71-90, 2002.
- [59]. Pulkkinen A., "Geomagnetic Induction During Highly Distributed Space Weather Conditions: studies of Ground Effects", Academic Dissertation in Physics, Finnish Meteorological Institute Contributions, No. 42, Finnish Meteorological Institute Contributions, Helsinki, 2003.
- [60]. Viljanen A., et al., "Fast computation of the geoelectric field using the method of elementary current systems and planar Earth models", Annales Geophysicae (2004) 22:101-113, European Geosciences Union 2004.
- [61]. Pulkkinen A., et al., "First-principles modelling of Geomagnetically induced electromagnetic fields and current from upstream solar wind to the surface of the Earth", Ann. Geophys., 25, 881-893, 2007, European Geosciences Union.
- [62]. Erinmez I. A., et al., "Application of Modelling Techniques to assess Geomagnetically induced current risks on the NGC transmission system", CIGRE Paper 39-304/2002-03-26.
- [63]. Molinski T. S., "Why utilities respect geomagnetically induced currents", Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 64 (2002), pp. 1767 – 1778.
- [64]. Lathtinen M. and Elovaara J., "GIC Occurences and GIC Test for 400 kV System Transformer", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No. 2, April 2002.

- [65]. Gaunt C. T. and Coetzee G., "Transformer failures in regions incorrectly considered to have low GIC-risk", Proc. of 2007 IEEE Lausanne Powertech, 1 – 5 July 2007, Lausanne, Switzerland.
- [66]. Koen J. and Gaunt T., "Geomagnetically Induced Currents in the Southern African Electricity Transmission Network", Proc. of 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference, June 23 – 26, Bologna, Italy.
- [67]. Liu C-H and Pirjola R., "Geomagnetically Induced Currents in the High-Voltage Power Grid in China", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 24, No. 4, October 2009.
- [68]. Pirjola R. J. and Boteler D. H., "Geomagnetically Induced Currents in European High-Voltage Power Systems", Proceedings of the Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, CCECE 2006, May 7-10, 2006, Ottawa Congress Centre, Ottawa, Canada. IEEE 2006.
- [69]. Sakharov Ya. A., Danilin A. N. and Ostafiyuchuk R. M., "Registration of GIC in Power systems of the Kola Peninsula", Proc. of 7-th Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, June 26 – 29, 2007, Saint-Petersburg, Russia.
- [70]. Wik M. et al., "Space weather events in July 1982 and October 2003 and the effects of Geomagnetically induced currents on the Swedish technical systems", Ann. Geophys., 27, 1775 – 1787, 2009.
- [71]. Bäckström M., "Förstudie: Skydd mot elektromagnetiska risker. Avsikliga elektromagnetiska störningar (IEMI).", Combitech AB, IK4-11:0104, 2011-10-10.

6 Förkortningar

EMI: *Electromagnetic Interference* (elektromagnetiska störningar).

ESA: *European Space Agency*. Den europeiska rymdorganisationen, 17 medlemsländer).

FOI: Totalförsvarets Forskningsinstitut.

GIC: *Geomagnetically Induced Currents* (geomagnetiskt inducerade strömmar).

HEMP: *High Altitude Electromagnetic Pulse*. Den elektromagnetiska puls som orsakas av en kärnvapenexplosion på hög höjd, över ungefär 40 km. Kallas också NEMP (nukleär elektromagnetisk puls).

KTH: Kungliga tekniska högskolan.

LTH: Lunds tekniska högskola.

MSB: Myndigheten för samhällsskydd och beredskap.

OKG: Oskarshamnsverkets kraftgrupp AB.

PTS: Post- och telestyrelsen.

UoH: Universitet och högskolor.