

2021:00209 - Åpen

# Rapport

## **Tiltak for å håndtere risiko og motvirke konsekvenser knyttet til geomagnetisk induisert strøm i kraftnettet**

### **Forfattere**

Olve Mo

Kristian Solheim Thinn



# Rapport

## Tiltak for å håndtere risiko og motvirke konsekvenser knyttet til geomagnetisk induisert strøm i kraftnettet

EMNEORD:  
Geomagnetisk  
indusert strøm  
Kraftnettet

VERSJON  
2.0

DATO  
2021-02-24

FORFATTERE  
Olve Mo  
Kristian Solheim Thinn

OPPDRAKSGIVER(E)  
NVE

OPPDRAKSGIVERS REF.  
Astri Gillund  
201600381-49

PROSJEKTNR  
502001693

ANTALL SIDER OG VEDLEGG:  
47

### SAMMENDRAG

I denne rapporten gis anbefalinger for tiltak som kan gjøres i det norske kraftnettet for å håndtere risiko og for å unngå havari og/eller utfall som følge av solstormer. Anbefalingene i rapporten bygger i stor grad på anbefalinger utstedt av institusjonene Electric Power Research Institute (EPRI) og North American Electric Reliability Corporation (NERC).

Geomagnetisk induisert strøm (GIC) som induseres under solstormer vil gi DC-strømmer i transmisjonslinjer. Disse kan potensielt ødelegge eller svekke utstyr og kan i verste tilfelle lede til samtidig utfall av kraftforsyningen over store områder.

Samtidig utfall over store områder, kombinert med skader på kritisk utstyr vil kunne ha store samfunnsmessige konsekvenser. Eiere og operatører av både transmisjonsnett og av produksjonsenheter knyttet opp mot transmisjonsnettet (vann- og vindkraft) bør derfor iverksette nødvendige tiltak for å håndtere risiko og motvirke konsekvenser knyttet til geomagnetisk induserte strømmer.

UTARBEIDET AV  
Olve Mo

SIGNATUR

*Olve Mo*

Olve Mo (24. Feb. 2021 13:05 GMT+1)

KONTROLLERT AV  
Kristian Solheim Thinn

SIGNATUR

*Kristian Solheim Thinn*

Kristian Solheim Thinn (24. Feb. 2021 12:09 GMT+1)

GODKJENT AV  
Dag Eirik Nordgård

SIGNATUR

*Dag Eirik Nordgård*

Dag Eirik Nordgård (24. Feb. 2021 13:06 GMT+1)

RAPPORTNR  
2021:00209

ISBN  
978-82-14-06456-8

GRADERING  
Åpen

GRADERING DENNE SIDE  
Åpen

# Historikk

---

<b>VERSJON</b>	<b>DATO</b>	<b>VERSJONSBEKRIVELSE</b>
0.0	2020-10-27	Uferdig utkast for informasjon / kommentar
1.0	2020-12-18	Utkast sendt ut som underlag for møte i januar
2.0	2021-02-24	Endelig versjon etter innarbeiding av tilbakemeldinger fra Statnett, Statkraft og NVE. En kort oppsummering av GIC-målinger er dessuten lagt til (avsnitt 2.3).

# Innholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>INTRODUKSJON</b> .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>SOLSTORMER OG DERES INNVIRKNING PÅ KRAFTSYSTEMET</b> .....	<b>6</b>
2.1	Solstormer.....	6
2.2	Innvirkning på kraftsystemet .....	7
2.3	Målinger av GIC i Trøndelag.....	9
<b>3</b>	<b>MULIGE KONSEKVENSER AV SOLSTORMENES PÅVIRKNING AV KRAFTSYSTEMET</b> .....	<b>11</b>
3.1	Sammenhenger.....	11
3.2	Metning i krafttransformatorer .....	13
3.3	Førhøyet reaktivt effektbehov for krafttransformatorer i metning .....	14
3.4	Overharmoniske generert av krafttransformatorer i metning .....	15
3.5	Skader på transformatorer på grunn av høy temperatur .....	16
3.6	Shuntreaktorer.....	17
3.7	Shuntkondensatorer, SVC-anlegg og harmoniske filter .....	17
3.8	Effektbrytere .....	18
3.9	Vern måler feil strøm på grunn av harmoniske .....	18
3.10	Metning av spenningstransformatorer (måletransformatorer) .....	18
3.11	Metning av strømtransformatorer .....	19
3.12	Generatorer .....	19
3.12.1	Tilleggstap i generatorer.....	19
3.12.2	Mekanisk resonans i generatorer .....	20
3.12.3	Økt reaktiv effektflyt i generator .....	20
3.13	Vindparker på land.....	21
3.14	Lange AC-kabler til offshore vindparker og offshore olje og gassinstallasjoner.....	22
3.15	Påvirkning av kommunikasjon .....	22
3.16	Ustabilitet i spenning .....	23
3.17	Overbelastning av overføringer og komponenter .....	23
<b>4</b>	<b>MULIGE TILTAK FOR Å MOTVIRKE KONSEKVENSER AV SOLSTORMER</b> .....	<b>24</b>
4.1	Hovedprinsipper .....	24
4.2	Tiltak for å begrense størrelsen på DC-strømmene.....	26
4.2.1	Passiv blokkering eller reduksjon av nullpunktstrøm.....	26
4.2.1.1	Resistans i nullpunkt.....	26
4.2.1.2	Kondensator i nullpunkt .....	26
4.2.1.3	Midlertidig isolering av nøytralepunkt .....	27
4.2.1.4	Spolejordet nøytralepunkt.....	27
4.2.1.5	Utfordringer med passiv blokkering .....	27

4.2.2	Aktiv regulering av DC-magnetisering via egen transformatorvikling.....	28
4.2.3	Aktiv regulering av DC-magnetisering ved hjelp av kraftelektronikk .....	28
4.2.4	Seriekompensering av kraftlinjer.....	28
4.3	Systemforbedringer for å være bedre forberedt.....	28
4.3.1	Vern .....	28
4.3.2	Generatorvern .....	29
4.3.3	Online overvåkning av harmoniske .....	29
4.3.4	Online overvåkning av reaktiv effektflyt og spenning .....	29
4.3.5	Ekstra målinger på transformatorer .....	29
4.3.6	Sette krav til nye transformatorer.....	30
4.4	Operasjonelle tiltak i forbindelse med en solstorm.....	30
4.4.1	Trigger for iverksetting av operasjonelle tiltak.....	30
4.4.2	Operasjonelle tiltak ved varslet hendelse 1 – 3 dager frem i tid.....	31
4.4.3	Operasjonelle tiltak timer før en ventet solstorm.....	31
4.4.4	Operasjonelle tiltak under selve solstormen.....	32
4.5	Operasjonelle tiltak etter en solstorm.....	32
4.6	Eksempel på operasjonelle tiltak som kan ha uheldig effekt .....	33
<b>5</b>	<b>Varsling av solstormer .....</b>	<b>34</b>
5.1	Behovet for å forutse solstormer.....	34
5.2	Prognosering av solstormer .....	34
5.3	Tjenesteleverandører.....	34
<b>6</b>	<b>HÅNTERING AV RISIKO FORÅRSAKET AV GEOMAGNETISK INDUSERT STRØM.....</b>	<b>35</b>
6.1	Hovedprinsipp.....	35
6.2	Gjennomgang av historiske data .....	37
6.3	Bestemme dimensjonerende hendelse .....	37
6.4	Lastflytberegninger .....	38
6.5	Vurdering av sårbarhet ovenfor GIC.....	41
6.6	Vurdering av transmisjonsnettets sårbarhet .....	41
6.7	Vurdering av produksjonens sårbarhet .....	41
6.8	Analyse av komponentpåkjenninger under GIC .....	42
6.9	Detaljert analyse av hvordan systemet påvirkes av GIC .....	42
6.10	Evaluer behov for systemforbedringer .....	42
6.11	Hensynta GIC ved nyanskaffelser og revidering av vernstrategier .....	43
6.12	Sanntidsovervåkning av sårbarhet.....	43
6.13	Definere triggere for aksjon og tilhørende operasjonelle prosedyrer.....	44
6.14	Oppfølging.....	44
<b>7</b>	<b>KONKLUSJONER OG ANBEFALINGER.....</b>	<b>45</b>

**REFERANSER ..... 46**

## 1 INTRODUKSJON

Solstormer kan indusere DC-lignende strømmer (Geomagnetisk induserte strømmer / Geomagnetically Induced Currents, GIC) i transmisjonsnettet som kan skade kritiske komponenter, destabilisere kraftforsyningen og resultere i langvarige strømstanser. Direktejordede transformatorer på de høyeste spenningsnivåene med lange overføringslinjer er mest utsatt. Hovedutfordringen er knyttet til metning av transformatorene som kan forårsake økt forbruk av reaktiv effekt, spenningsfall i nettet og overoppheting av transformatorene.

Målet med rapporten er å beskrive tiltak som kan gjøres i det norske kraftnettet for å håndtere risiko og å unngå havari og/eller utfall som følge av solstormer. Tiltakene er gitt i Kapittel 6. I de følgende kapitlene beskrives først hvordan solstormenes virker inn på kraftsystemet (Kapittel 3), hvilke mulige tiltak som kan gjøres for å motvirke konsekvensene (Kapittel 4) og metodikk for å forutse solstormer og konsekvensene av disse (Kapittel 5).

Innholdet i rapporten er i hovedsak hentet fra litteratur. Det er gjort mye godt arbeid på området de siste årene, blant annet Cigre og kanskje spesielt i Nord-Amerika der institusjonene Electric Power Research Institute (EPRI) og North American Electric Reliability Corporation (NERC) har publisert retningslinjer og anbefalinger for eiere av transmisjonsnett i Nord-Amerika. Anbefalingene i denne rapporten bygger i stor grad på disse, samt annen publisert litteratur, siden det ikke har vært rom for å gjøre egne undersøkelser i arbeidet med denne rapporten.

## 2 SOLSTORMER OG DERES INNVIRKNING PÅ KRAFTSYSTEMET

### 2.1 Solstormer

Sola slynger hele tiden ut elektromagnetisk stråling og elektrisk ladde partikler. De ladde partiklene blir slyngt ut på grunn av magnetisk ustabilitet i de ytre lagene på sola. Partiklene kan ha hastigheter på 100 km/s, og ankommer jordens bane mellom 20 timer og noen døgn etterpå.

En solstorm som når jorda innebærer at ladde partikler passerer gjennom jordens atmosfære i høy hastighet (elektro-jet / ionosfærestømmer i 100 – 120 km høyde). Disse kan tilsvare en elektrisk strøm på langt over en million ampere. Disse kan bevege seg mer og mindre tilfeldig, strømmer vil flyte både horisontalt, parallelt med jorda, men det vil også kunne flyte vertikale strømmer. Intensiteten varierer på en slik måte at dette kan sees på som en langsomtvarierende DC-strøm (kvasi DC strøm). Sammenlignet med 50 Hz strøm i kraftsystemet vil den kunne betraktes som en ren likestrøm.

I henhold til [32] kan magnetfeltene karakteriseres som Sudden Impulse (SI), Electrojet, og Coronal Hole High Speed Stream (CHHSS) bølger. Her vil alle disse behandles under ett og generelt omtales som solstormer.

Strømmene i atmosfæren varierer imidlertid tilstrekkelig til at magnetfeltet som strømmen setter opp, induserer et elektrisk felt i jordoverflaten siden tidsvarierende magnetfelt danner elektriske felt. Det elektriske feltet som settes opp i jordoverflata vil i henhold til fysikkens lover orientere seg slik at det driver en strøm som vil produsere et magnetfelt som prøver å nulle ut endringer i det langsomtvarierende magnetfeltet som settes av atmosfærestømmene.

Størrelsen på den induerte spenningen i overflata avhenger av størrelsen på strømmene i atmosfæren, hvor raskt strømmene, og dermed magnetfeltet, fra disse varierer samt konduktiviteten nedover i jordskorpa. Lav konduktivitet i overflata vil gi en høyere induert spenning i overflata og vise versa. I henhold til konklusjoner fra beregninger gjort av Finnish Meteorological Institute [29] konkluderte de med at en i Norge i perioden 1994-2011 sannsynligvis opplevde et elektrisk felt på maksimalt 5 V/km på grunn av solstormer. Rapporten estimerte videre at et verste tilfelle i løpet av hundre år vil være under 10 V/km. Dette er usikre tall siden det er begrenset med tilgjengelige magnetfeltmålinger rundt omkring i landet og siden de største hendelser oppstår veldig sjelden.

Dette er analogt, og samme fenomen, som når en elektrisk strøm i en leder generer hvirvelstrømmer i nærliggende elektriske ledende materialer. For 50 Hz strømmer i nærheten av kobber vil det typisk opptre hvirvelstrømmer i den ytterste centimeterer av strømleneren (inntrengingsdybden for 50 Hz i kobber). Atmosfærestømmene har imidlertid svært lave frekvenser, og jorda har stedvis lav konduktivitet. Dette gjør at inntrengingsdybden for GIC strømmer blir flere hundre kilometer.

Det elektriske feltet vil ikke kun eksistere nede i jorda. Det er vanlig å regne med at det elektriske feltet som kraftledningene over jorda vil oppleve, vil være tilnærmet likt med det induerte feltet som settes opp i jordoverflata rett under kraftledningen. En slik tilnærming kan gjøres siden avstand opp til strømmene i atmosfæren er veldig stor sammenlignet med avstand mellom jordoverflata og kraftledningene, og siden magnetfeltbidrag fra GIC-strømmene i kraftledningene er ubetydelige sammenlignet med virkningen av GIC-strømmene i jordskorpa. Kraftledninger, og alle andre metallstrukturer i, på og over jorda, vil derfor under GIC befinne seg i et tidsvarierende elektrisk felt satt opp av det tidsvarierende magnetfeltet fra solstormer.

Varigheten til GIC er ofte bare noen minutter. For kraftige solstormer kan varigheten være en dag eller to. Ofte er det høy aktivitet i en time eller to etterfulgt av rolig aktivitet.

Tallet på solflekker sier noe om sannsynligheten og frekvensen for intenst romvær. Solflekker er de magnetisk aktive regionene i solens øvre lag. Opprinnelsen av solstormer er ofte i nærheten av eller i solflekkeene. Solflekkeene kan sees i enkle teleskop, og siden de er så enkle å se har man målinger tilbake til 1750. Observasjoner av solflekker varierer i 11-årsykluser. Det forventes at en ny syklus starter cirka i 2020 (kan ikke fastslås eksakt). Maksimal innvirkning på kraftsystemet vil en typisk da ha 3 – 5 år etter syklus starter [6], altså i 2023 – 2025. Det er dog ikke gitt at de verste hendelser vil skje i de mest aktive perioder.

Flere detaljer om fenomenene og beskrivelser av historiske hendelser kan finnes for eksempel i Cigré rapport 780 [32]. Der kan en også lese mer om forskjellene på fenomenene Sudden Impulse (SI), Electrojet waveforms, og Coronal Hole High Speed Stream (CHHSS)

## 2.2 Innvirkning på kraftsystemet

Det elektriske feltet som kraftledningene befinner seg i, er små sammenlignet med systemspenninger i transmisjonsnettet. For en 100 km kraftledning vil en med et elektrisk felt på 7 V/km for eksempel få en spenning på 700 V langs kraftlinjen (integralet av det elektriske felt langs linja). Denne spenningen vil være lik i alle tre faser i et trefasesystem siden de alle befinner seg tilnærmet samme elektriske felt som i jordoverflaten rett under ledningene. Dette vil dessuten være tilnærmet en DC-spenning. Siden spenningen er lik i alle faser så må denne ta samme vei som nullsystem-strømmer i AC-nettet. Det vil ikke flyte noe strøm med mindre det er kobling mot jord slik at en har en lukket sløyfe (retur via jord).

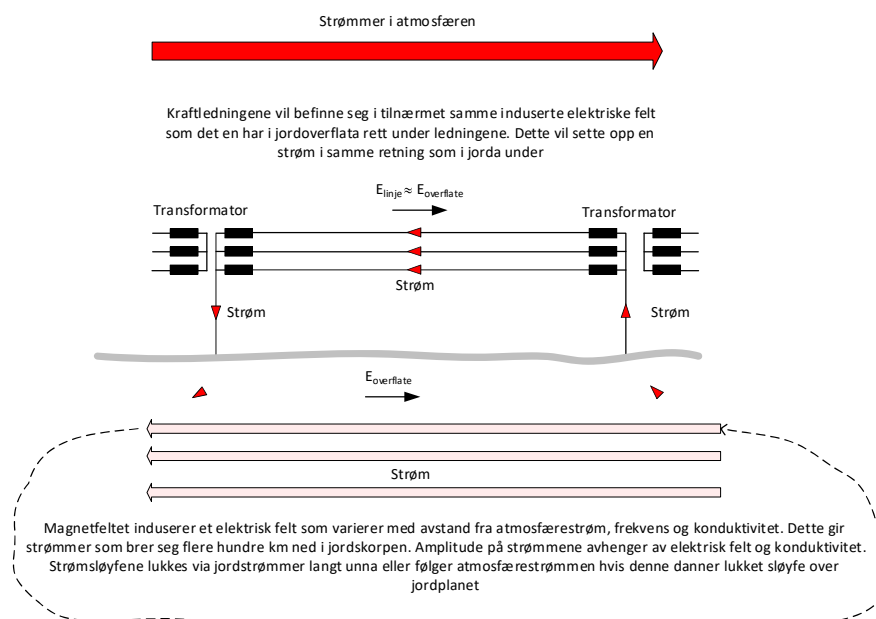


For kraftlinjer har man kobling til jord i de tilfeller at en har transformatorer med nøytralpunkt koblet til jord, direkte eller via en impedans (illustrert i Figur 1). En annen kobling mot jord som kan finnes på enkelte kraftlinjer, er shuntreaktorer med jordet nøytralpunkt (se Figur 2). I figuren er det også forsøkt illustrert hvordan sammenhengen er mellom orientering av atomsfærestrøm, elektrisk felt og GIC-strømmer i kraftledning og jord. Merk at strømmen i jordoverflata (og flere hunder km ned) går i samme retning som strømmen i kraftledningen og at returstrømmen går enda lenger unna (prinsipielt rundt hele jorda, i henhold til prinsippet om minste motstands vei).

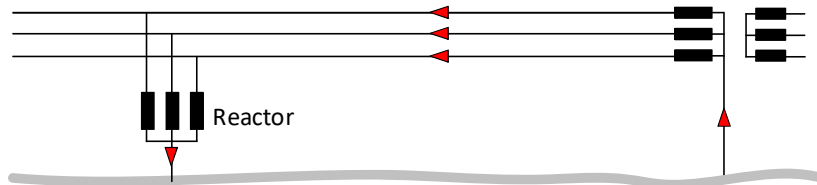
Det er ellers viktig å merke seg at det ikke har noen betydning om en ser på en kabel eller en luftlinje. Det avgjørende er om det finnes en vei for DC-strømmen ned til jord. Det vil induseres spenninger i kabler og skjermer på kabler også, uavhengig av om de er gravd ned eller ikke så vil de utsettes for tilnærmet samme elektriske felt. Luftledninger er normalt mye lengre enn kabler og dermed vil en ikke få like høy spenning og dermed også mindre strømmer i kabler sammenlignet med luftledninger. GIC er derfor ikke omtalt som et problem for kabler i samme grad som for luftlinjer. Ethvert godt ledende objekt med lang utstrekning vil imidlertid kunne påvirkes av GIC (oljeledninger, telefonledninger (kobber), skjermer på kabler etc.).

Beregninger som Finnish Meteorological Institute [29] har gjort for Statnett konkluderte med at den største 10-sekunders GIC-strøm som kan forventes i en transformatorstasjon er på 400 A og at GIC-strømmene vil kunne gå over 200 A i omkring 15 stasjoner (sum strøm i alle nøytralpunkt i transformatorstasjonen). For autotransformatorer kan en i verste fall nå opp i 600 A. I analysen fant man at en sannsynligvis hadde i størrelsesorden 10-50 tilfeller med strømmer over 100 A i løpet av perioden 1994 -2011 som var den perioden med målte magnetfelt en tok utgangspunkt i. Ikke alle transformatorstasjoner vil oppleve slike verdier og i de fleste stasjoner vil strømmen kunne fordele seg på flere transformatorer. Rapporten konkluderte videre med at en hundreårshendelse ville kunne ha 1.5 – 2 ganger høyere GIC-strøm.

I neste kapittel er det forklart hvilke konsekvenser slike strømmer kan ha på kraftsystemet og hvordan dette i verste fall kan lede til avbrudd i kraftforsyningen til store områder.



Figur 1: Illustrasjon av jetstrøm, indusert spenning i jord, samt hvordan GIC strømmen flyter.



Figur 2: Illustrasjon av GIC strømmer gjennom transformator og shuntreaktor.

### 2.3 Målinger av GIC i Trøndelag

Høsten 2019 ble det montert fire GIC-sensorer på en 420 kV transformator i Trøndelag, som vist i Figur 3. Målet er å samle data for å finne en sammenheng mellom endringer i magnetfeltet rundt jorda og GIC-strømmer i denne transformatoren. Universitet i Tromsø har flere magnetometer i Norge for å måle magnetfeltet. GIC-sensorene er av typen Hall Effekt, med lavpassfilter for å filtrere bort signaler med frekvens over noen få Hz. Sensorene er kjøpt fra Advanced Power Technologies og Dynamic Rating, begge lokalisert i USA. Den aktuelle transformatoren ble valgt ettersom det for denne var utfordringer i forbindelse med solaktivitet en gang i 2017 og en gang i 2018. Det var utfall på nabostasjonen.

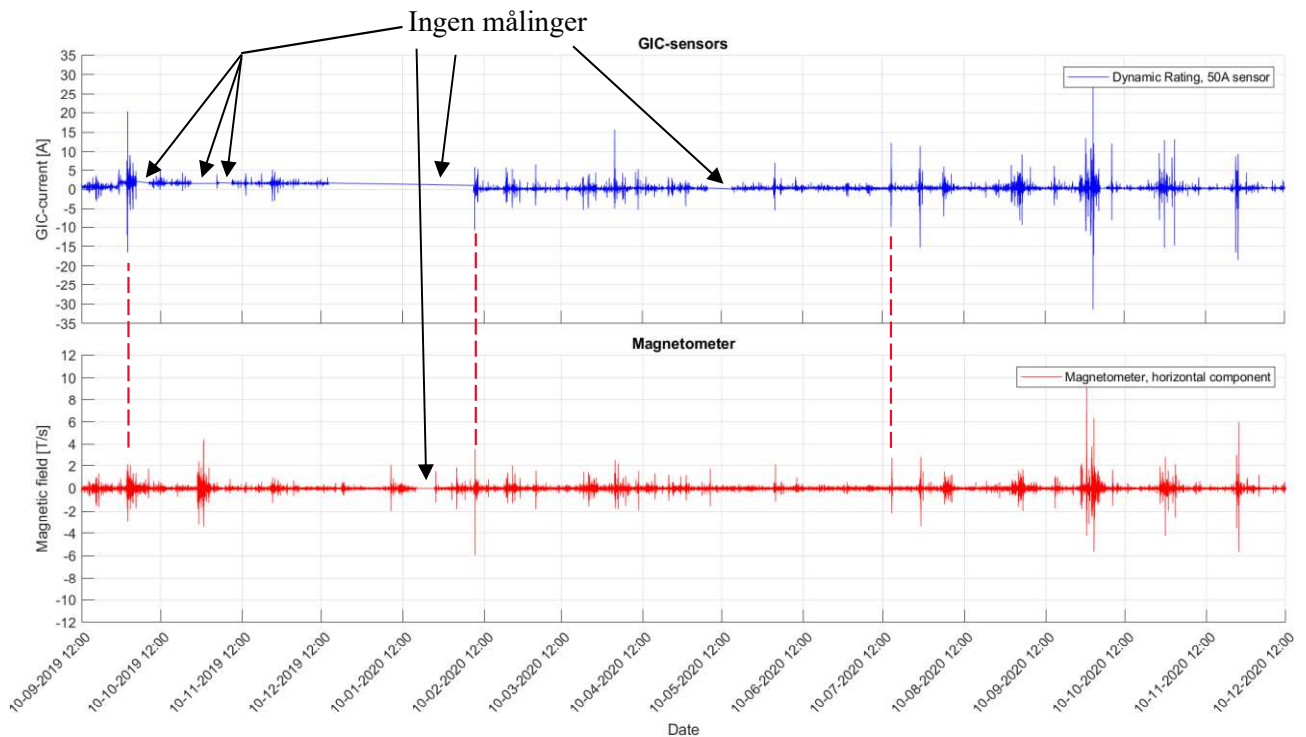


Figur 3: Fire GIC-sensorer montert på jordskinnen/nøytralpunktet på en 420 kV transformator i Trøndelag. De to svarte sensorene er fra Advanced Power Technologies, de to røde fra Dynamic Rating. Sensorene har måleområde +/-50 A og +/-500 A.

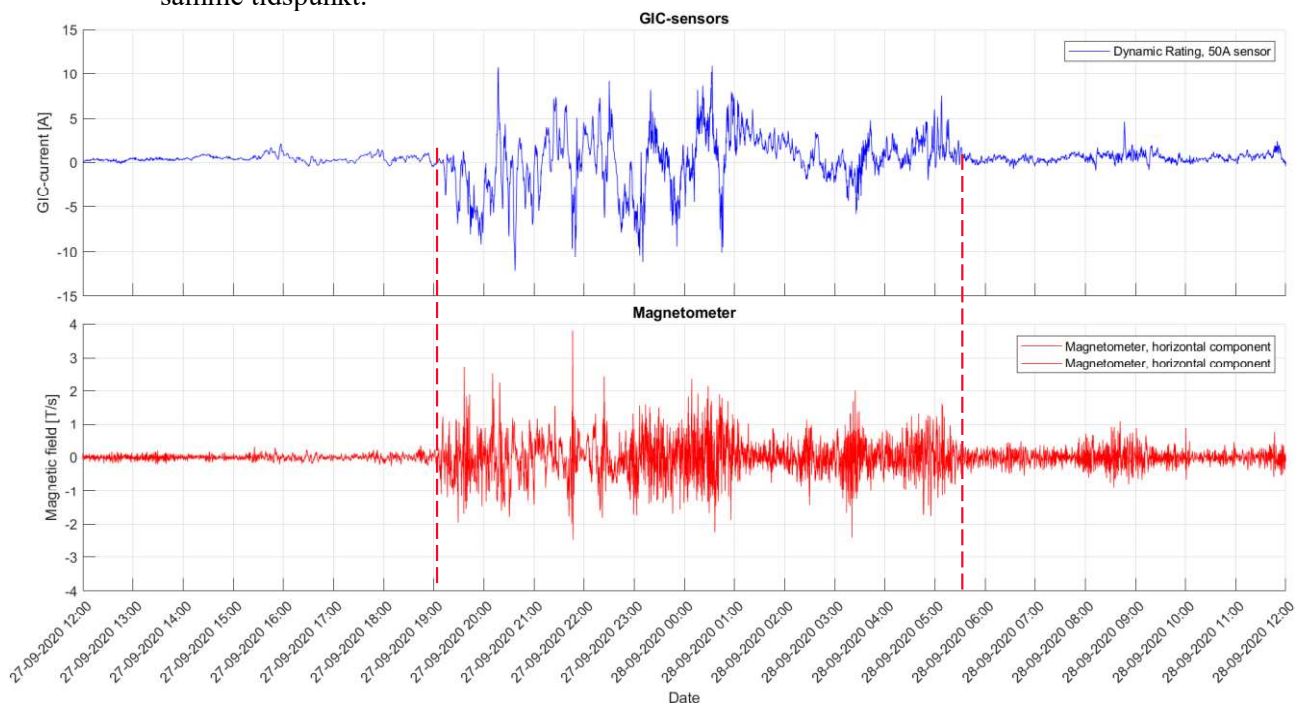
Figur 4 og Figur 5 viser noen foreløpige målinger fra GIC-sensorene og målinger av endringer i magnetfelt. De tre andre GIC-sensorene viser tilsvarende verdier. På overordnet nivå er det en tydelig sammenheng mellom GIC og endringer i magnetfeltet. Ved å se på en enkelt dag (Figur 5) kommer det frem at GIC og endring i magnetfelt opptrer samtidig, men amplitude og retningsendringer sammenfaller ikke helt. Det ser ut til at GIC fra 10-35 A opptrer ved endringer i magnetfelt på rundt 3-10 T/s.

Magnetfeltdataene er hentet fra målestasjonen på Rørvik, som er nærmeste base til der hvor GIC-sensorene er installert. Dataene lagres hvert 10. sekund. Dog gjøres det to målinger i sekundet, og det er gjennomsnittet av disse som oppgis. GIC-sensorene måler hvert 15. sekund. I figurene under oppgis variasjoner i magnetfeltet som en absoluttverdi. Den har en nord- og østkomponent, men det er altså ikke tatt hensyn til her. Nordkomponenten dominerer. Magnetfeltet som måles er summen av strømmen i ionosfæren og magnetfeltet fra den induserte strømmen i jordskorpa. Inntil 40% av utslaget vil typisk være fra strømmene i jordskorpa.

Mer prosesserte resultater vil bli publisert når man har tilstrekkelig måledata, antakeligvis i 2021 eller 2022.



Figur 4: Målinger av GIC i en transformator i Trøndelag og magnetfelt fra Rørvik, sept 2019 – des 2020. De stiplede røde strekene indikerer at utslagene i GIC- og magnetfeltmålinger registreres på samme tidspunkt.



Figur 5: Målinger av GIC i en transformator i Trøndelag og magnetfelt fra Rørvik. De stiplede røde strekene indikerer at utslagene i GIC- og magnetfeltmålinger registreres på samme tidspunkt.

## 3 MULIGE KONSEKVENSER AV SOLSTORMENES PÅVIRKNING AV KRAFTSYSTEMET

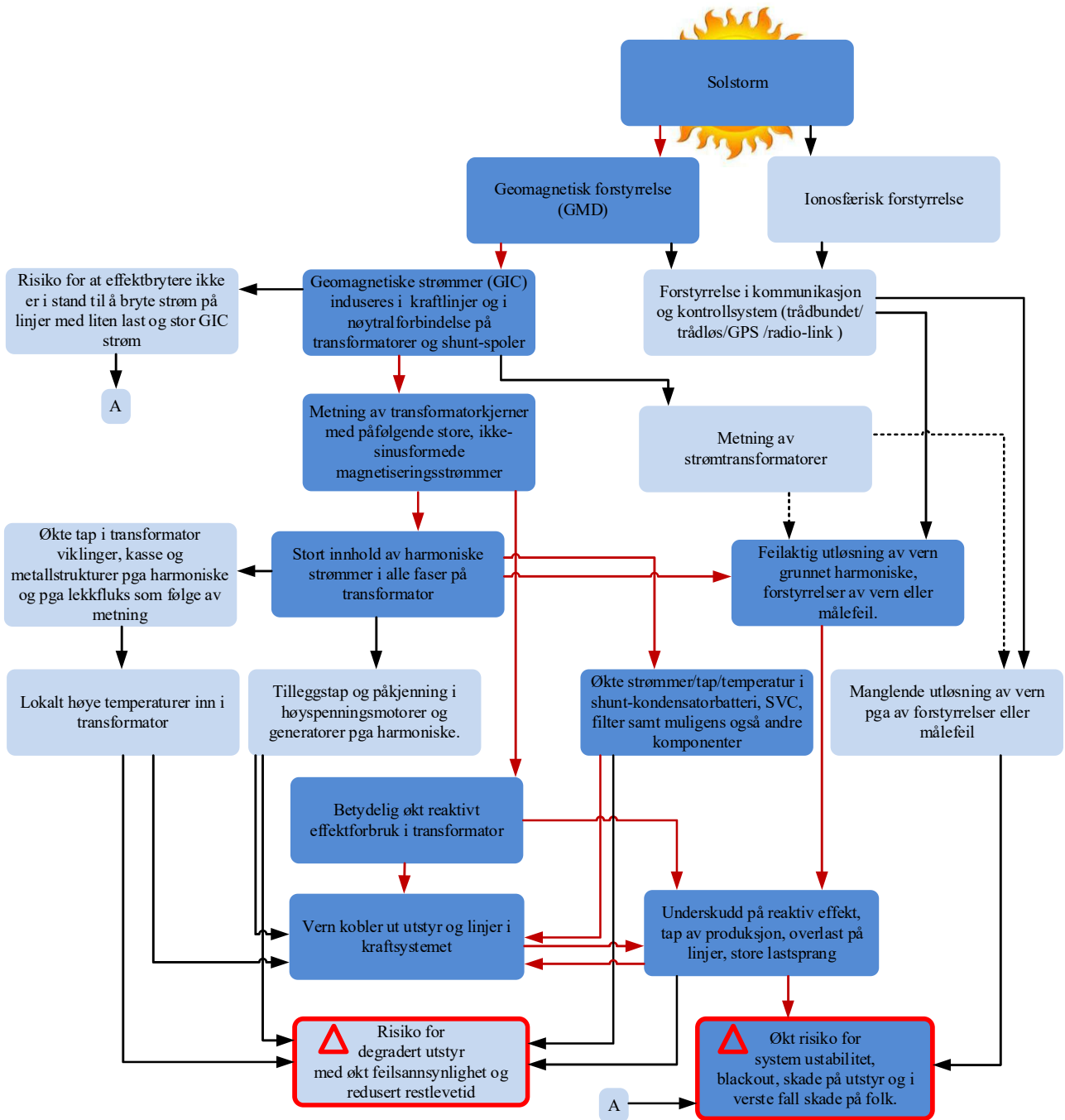
### 3.1 Sammenhenger

Det er i Figur 6 forsøkt å illustrere hvordan en solstorm direkte og indirekte vil kunne påvirke kraftsystemet. Boksene med mørkeblå farge, og de røde pilene, representerer de effekter og sammenhenger som ut fra erfaring har vist seg å være de farligste, og som følgelig er de en bør prøve å håndtere. De lyseblå boksene og svarte pilene er også omforente sammenhenger og effekter, men disse har så langt ikke vist seg å ha samme potensial til å initiere større utfall, selv om det selvsagt er alvorlig nok å få redusert levetid på en transformator.

Oppsummert er det følgende effekter som har vist seg å ha størst konsekvens:

- Metning av krafttransformatorer i transmisjonsnettet.
- Økte reaktive strømmer i transmisjonsnettet pga. metning i transformator.
- Utkobling av reaktiv kompensering pga. store harmoniske strømmer forårsaket av transformatorer i metning.
- Underskudd av reaktiv effekt pga. utkoblinger av kompensering og pga. økt reaktivt forbruk i transformatorer.
- Utkoblinger på grunn av overlast på overføringer grunnet høy reaktive effektflyt.
- Eskalerende situasjon med økende overlast, utkoblinger, stabilitetsproblemer, pendlinger og i verste fall full blackout.

I de påfølgende avsnitt er det forklart mer i detalj hvordan solstormene kan lede frem til sammenhengene og effektene vist i Figur 6.



Figur 6: Illustrasjon som viser hvordan en solstorm potensielt påvirker kraftsystemet direkte og indirekte. Hendelser som har vist seg å være mest kritisk er markert med mørk blå farge / røde piler.

### 3.2 Metning i krafttransformatorer

Solstormer utgjør høyest risiko når store geomagnetisk induserte strømmer ledes gjennom transformatorviklingene slik at disse bidrar til et DC magnetfelt i transformatorens jernkjerne.

Transformatorer er laget for vekselspanning. Den geomagnetisk induserte strømmen som ledes til og fra jord gjennom transformatorviklinger og nøytralimpedans vil være å betrakte som langsomtvarierende DC-strømmer. Disse vil drive transformatorkjernen i metning siden de gir et DC-bidrag til magnetfelt i kjernen som i sin tur medfører at en får så kraftig magnetfelt at kjernen går inn i metning.

Kraftig metning vil føre til store, asymmetriske og ikke-sinusformede magnetiseringsstrømmer, lignende de en ser ved spenningssetting av transformatorer, med den forskjell at disse kan være av vesentlig lengre varighet enn ved spenningssetting av transformator (illustrert i Figur 7). Selv om de flyter i samme kraftledninger er det her viktig å forstå forskjellen (1) GIC-strømmen som er en DC-strøm som flyter likt i alle tre faser, drevet av indusert spenning fra atomsfærestrømmer, og (2) resulterende magnetiseringsstrøm som er en "vanlig" trefasestrøm som drives av generatorene i nettet.

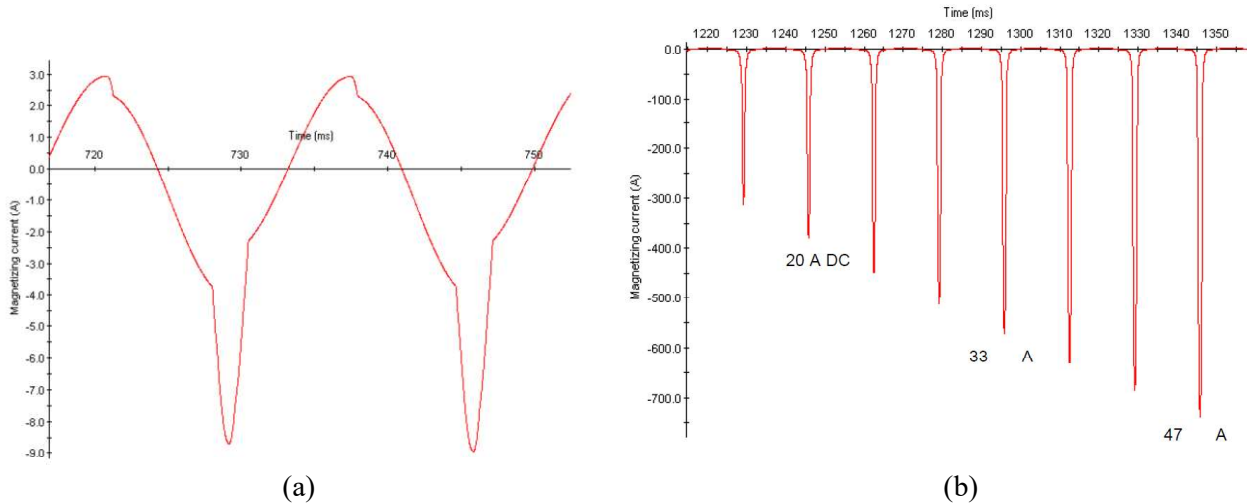
En vil også ha en nullsystemkomponent av magnetiseringsstrømmen som flyter gjennom nøytralkoblingen mot jord. Denne vil typisk være mye mindre og en vil derfor få begrenset informasjon om størrelsen på de harmoniske i AC-nettet ved å se på nullpunktstrømmen.

Metningen vil ha som konsekvens at transformatoren vil trekke stor reaktiv effekt og at den vil trekke store harmoniske strømmer. Både høy reaktiv effekt og harmoniske strømmer kan påvirke resten av kraftsystemet. Disse kan føre til ustabilitet, overbelastning og uønskede utkoblinger (mere om dette i egne avsnitt). Spesielt kritisk kan dette være fordi mange transformatorer kan bli utsatt for det samme over store områder samtidig.

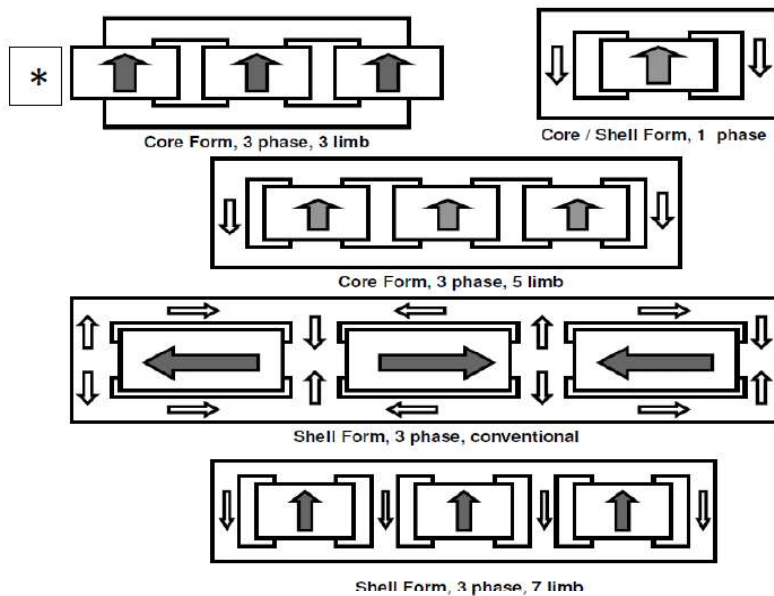
En annen observerbar indikasjon på at en transformator er drevet i metning, er unormalt mye lyd som følge av harmoniske og magnetfluks på avveier som skaper unormale krefter og vibrasjoner.

Trefasetransformatorer med tre bein vil typisk tåle mere likestrøm før de går i metning, noe som betyr at de tåler høyere GIC før de skaper problemer. Trefasetransformatorer med fem bein og transformatorer satt sammen av tre en-fase-transformatorer vil lettere gå i kraftig metning. Den magnetiske fluksen som settes opp i de tre fasene som følge av GIC vil normalt alltid være rettet samme vei. I en trebeint transformator vil returfluksen måtte finne veier utenom kjernen og den vil dermed møte stor motstand, sammenlignet med en transformator med fem bein, eller i en-fase enheter, hvor returfluksen kan følge jernkjernen. Se illustrasjon i Figur 8. Dette betyr at en må ha en større DC-strøm for å få tilstrekkelig fluks til å kjøre en trebeint transformator i metning. Dermed blir også denne mer motstandsdyktig mot GIC.

Det er verdt å merke seg at metning i transformator, direkte eller indirekte, er årsak til så og si alle vesentlige problemer som er blitt observert i kraftsystemet i forbindelse med GIC.



Figur 7: Illustrasjon av magnetiseringsstrøm for krafttransformator i moderat metning (a). Strømmen vil ikke lenger være sinusformet. Med kraftig metning som i (b) vil en få ekstreme strømtopper, og da økende med økende DC-strøm (fra [10]).



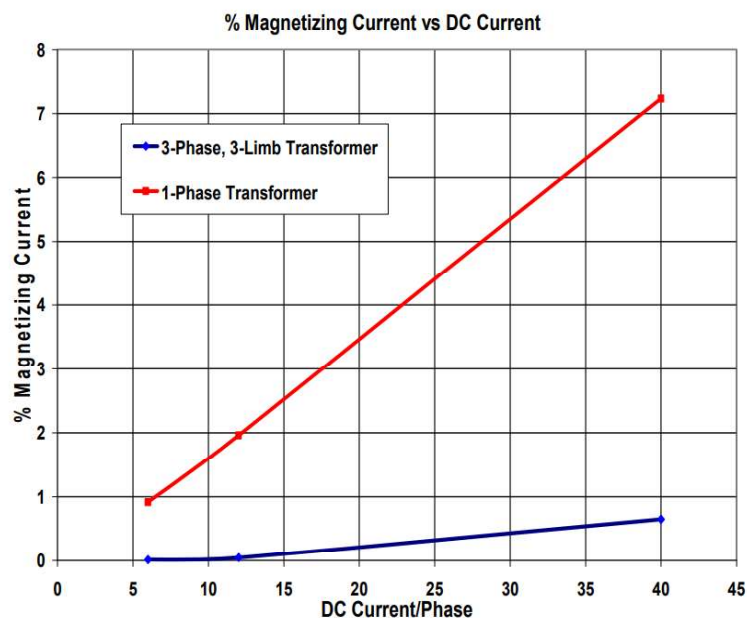
Figur 8: Illustrasjon av hvor fluks satt opp av DC-strømmer kan ta veien i de forskjellige varianter av transformator design. En ser at for 3-fase, 3-beint transformator så er det ingen returvei langs en jernkerne. Her vil fluksen måtte ta veien gjennom luft og transformator kasse. De hvite pilene viser veier for returfluks i jern for de andre variantene (fra [10]).

### 3.3 Førhøyet reaktivt effektbehov for krafttransformatorer i metning

En transformator vil typisk ved merkedrift ha en magnetiseringsstrøm på fra under en prosent til noen få prosent, avhengig av design, type blikk og tverrsnitt på kjernemateriale. Størrelsen på magnetiseringsstrømmen vil endre seg dramatisk hvis transformatoren går i metning (se Figur 7). Dette skjer typisk ved innkobling av en transformator, hvor en får innkoblingsstrømmer (in-rush) som dempes ut etter en stund. Førhøyet magnetiseringsstrøm får en også hvis AC-spenningen økes, og da spesielt hvis den øker vesentlig over merkespenning.

En likestrøm gjennom viklingene slik som en får ved GIC, vil ha samme virkning. Da vil kjernen drives i metning, i hver positive eller negative halvperiode, avhengig av retning på likestrømmen, og den ekvivalente magnetiseringsinduktansen som 50 Hz spenning ser vil reduseres dramatisk. Effekten blir i prinsippet den samme som om man hadde koblet inn ekstra shuntreaktorer, det vil flyte en stor reaktiv effekt inn i transformatoren. Avhengig av spennings- og impedansforhold i nettet vil den reaktive effekten som transformatoren trenger trekkes fra primær- og/eller sekundærside, uavhengig av koblingsgruppe og uavhengig av hvilken side GIC-strømmene kom inn.

Det reaktive effektbehovet til en transformator kan under GIC bli betydelig. Dette er illustrert i Figur 9 som viser resulterende magnetiseringsstrøm som funksjon av GIC-strøm for to transformatorer. Den økte reaktive effekten kan ha betydelig innvirkning på reaktiv effektbalanse i nettet hvis mange transformatorer går i metning samtidig på grunn av samme GIC-hendelse.



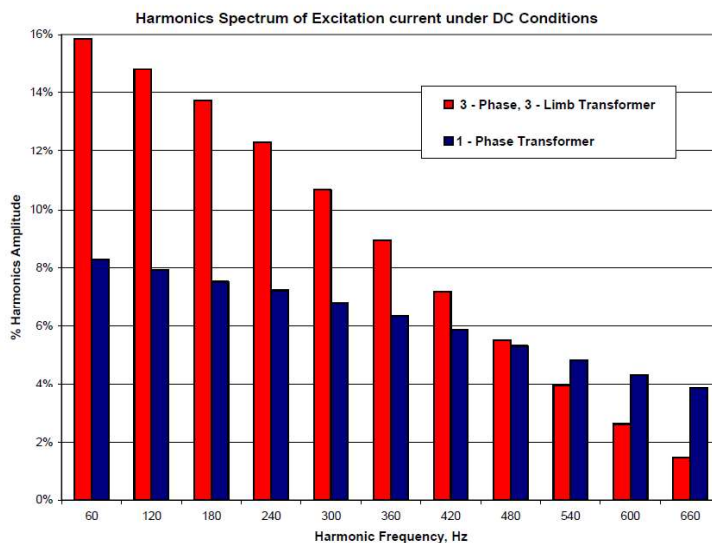
Figur 9: Beregnet økt magnetiseringsstrøm for to forskjellige transformatorer (trefase, trebeint, versus trefase satt sammen av tre enfase enheter (fra [16])).

### 3.4 Overharmoniske generert av krafttransformatorer i metning

Som det fremgår av Figur 7 så gir metning kraftig forvrengte strømmer. Disse vil dessuten være atypiske harmoniske i nettet, tilsvarende de atypiske en har ved spenningssetting av transformator. En vil finne både partall og oddetalls harmoniske, inkludert også harmoniske med negativ fasefølge. Forskjellige transformatorer vil gi forskjellig harmonisk bidrag. Fordelingen av harmoniske for en og samme transformator vil dessuten endre seg avhengig av grad av metning.

De harmoniske strømmene vil fordele seg utover i nettet og bidra til den totale harmoniske forvrengningen. Dette vil typisk gi tilleggslag i både transformator og andre komponenter, og kan dessuten trigge vern til å koble ut komponenter. I tillegg vil det også være harmoniske i nullsystemet. Harmoniske i nullsystemet kan gi uvanlig høy strøm i nøytralepunkt på komponenter i nettet, noe som også kan føre til at vern kobler ut komponenter.





Figur 10: Eksempel på harmonisk innhold i magnetiseringsstrøm for transformator i metning som følge av GIC (her for 60 Hz nett), (Fra [10]). En ser en prinsipiell forskjell i distribusjon og amplitude avhengig av transformator design.

### 3.5 Skader på transformatorer på grunn av høy temperatur

Langvarig metning av transformator kan være en risiko for transformatoren. De reaktive og de harmoniske strømmene vil gi ekstra tapsvarme i viklingene, men ikke nødvendigvis mer enn den er dimensjonert for (avhenger av belastning). Verre er det at metningen vil medføre at magnetfeltene, etter hvert som kjernen går i metning, vil fordele seg og ta andre veier siden reluktansen i jernet vil nærme seg reluktans i luft og da vil ikke lenger magnetfeltet foretrekke å følge jernkjernen. Magnetfelt på avveier vil kunne indusere hvirvelstrømmer og dermed tilleggslag både i viklinger og andre metalleder i transformatoren. En kan dermed få punkter med unormalt høye temperaturer som over tid (ved gjentatte hendelser) vil kunne bryte ned nærliggende elektrisk isolasjonen og føre til redusert levetid og havari.

Som ellers så er oppvarming noe som tar en viss tid på grunn av varmekapasitet i både metall og olje. Langvarige eller gjentatte GIC-strømmer med kun korte pauser gir derfor størst temperaturstigning. En må dessuten se på den totale belastning siden alle de følgende faktorer potensielt bidrar til økt temperatur under GIC:

- Økt reaktivt effektforbruk i transformator → mer 50 Hz strøm → mer tap.
- Økt harmoniske strømmer → hvirvelstrømmer / strømfortrengning → mer tap.
- Magnetfelt på avveier → hvirvelstrømmer ⇒ mer tap.
- Utfall av linjer / produksjon → mer last → mer tap.

Det må her legges til at det ikke finnes mange dokumenterte tilfeller på at dette faktisk har ført til havarier mens en GIC-hendelse pågår, selv om det finnes alvorlig eksempler, blant annet fra hendelsen i Nord-Amerika i 1989 da viklinger i to transformatorer ble ødelagt under GIC [17].

Havari under selve GIC-hendelsen er ikke nødvendigvis den største bekymring. Bekymringen er like mye at langsiktige konsekvenser for levetid og for at transformator feiler på et senere tidspunkt.

### 3.6 Shuntreaktorer

I shuntreaktorer vil det kunne flyte DC-strømmer på samme måte som i transformatorer. Shuntspoler uten jernkjerne vil ikke kunne gå i metning på samme måte som en transformator (luft går ikke i metning). En risikerer derfor ikke skade på disse. Deres betydning i GIC-sammenheng er kun at de gir en vei for DC-strømmer så lenge nøytralpunktet er koblet til jord.

Shuntreaktorer med jernkjerne vil være utstyrt med ett eller flere luftgap i kjernen. Luftgapet gjør at disse ikke så enkelt drives i metning siden luftgapet gir høy reluktans. En vil derfor ikke få samme dramatiske økning i reaktiv strøm og harmoniske som i en transformator. Siden kjernen ikke går like hardt i metning vil en heller ikke få samme problem med oppvarming av metalldeleler på grunn av magnetfelt som tar nye veier. Referanse [20] viser imidlertid at også shuntreaktorer vil få økt hot-spot temperatur, selv om effekten er mye mindre enn i transformatorer.

I følge [10] er DC-motstand i shuntreaktorer vesentlig høyere enn i transformatorer. Dette impliserer at DC-strømmene i hovedsak vil flyte til jord gjennom transformatorer og at shuntreaktorene vil ha mindre betydning.

Shuntreaktorene settes inn for å kompensere for kapasitive linjer og kabler. Siden shuntreaktorer er forbrukere av reaktiv effekt kan det være gunstig å koble disse ut i forkant av en varslet GIC-hendelse slik at en har større reserver av reaktiv ytelse. Dette forutsetter selvsagt at systemet er tilstrekkelig stabilt uten disse innkoblet.

### 3.7 Shuntkondensatorer, SVC-anlegg og harmoniske filter

Kondensatorbatteri og SVC-anlegg benyttes til kompensering av reaktiv effekt. Disse kan lett bli overbelastet hvis det er mye harmoniske i spenningen siden kondensatorene representerer en lav impedans for de høyere frekvenser. En får da høyt innhold av harmoniske strømmer i kondensatorene, og dermed større tap og høyere temperatur. Kondensatorbatterier er derfor utstyrt med vern som kobler disse ut hvis det går for mye strøm. Ved en GIC-hendelse vil transformormetning gi høye harmoniske og en risikerer utkobling av kondensatorbatteri. Dette er imidlertid en meget uheldig handling under en GIC-hendelse siden transformatorene trekker høy reaktiv effekt. Hvis en i tillegg kobler ut kondensatorbatteriet som leverer reaktiv effekt, kan en raskt få underskudd på reaktiv effekt og dermed kollaps.

Utkobling av kondensatorbatteri er altså en følgeeffekt av at transformatorene går i metning, samtidig som bortfall av kondensatorene bidrar til ytterligere fare for underskudd på reaktiv effekt. Det var nettopp en slik kombinert effekt som i mars 1989 medførte et større utfall i USA og Canada.

Store HVDC-anlegg og andre anlegg med likerettere vil typisk være utrustet med filter. Disse vil på samme måte som kondensatorbatterier være utsatt for forhøyet strøm som følge av harmoniske generert av transformatorer i metning. Følgelig vil en også risikere at disse kobler ut. Filterbanker bidrar typisk også med reaktiv effekt, slik at en utkobling vil kunne medvirke til økt underskudd på reaktiv effekt. I tillegg vil det være risiko for at HVDC-overføringen er satt opp slik at denne kobler ut, eller reduserer effektoverføringen, hvis filterbanken kobler ut. Dette vil gi en vesentlig forstyrrelser i effektflyt i nettet som igjen kan bidra til overbelastning og kollaps.

Filter og kondensatorbatterier kan videre være utstyrt med vern mot usymmetrisk last, basert på måling av strøm i nullpunkt. De atypiske harmoniske fra en transformator i metning kan gi falsk utløsning av slike vern grunnet harmoniske i nullsystemet. Statnett har opplyst at i Norge er det generelt benyttet vern i kondensatorbatterienes nullpunkt som filtrerer vekk overharmoniske (i motsetning til hva som har vært tilfelle i blant annet Nord-Amerika).

### 3.8 Effektbrytere

Effektbrytere baserer seg på å bryte i nullgjennomgang på strømmen. Hvis AC-laststrøm amplitude er mindre enn størrelsen på GIC DC-strøm vil det kunne bli langt mellom nullgjennomgangene. GIC-strømmer skifter riktignok også polaritet, men typisk med så lange perioder at de kan betraktes som DC-strømmer sammenlignet med 50 Hz. I prinsippet har en da risiko for at bryter ikke klarer å bryte strømmen og blir stående med lysbue inntil GIC-strømmen reduseres, eller skifter polaritet. Dette kan potensielt ødelegge bryteren. Forankoblet vern kan berge situasjonen hvis bryter til dette vernet har en strøm med definerte nullgjennomganger.

Kombinasjon GIC og veldig lav last på en linje kan altså representere en risiko hvis bryteren blir åpnet mens GIC pågår. Sannsynligheten er dog liten for at en trenger å åpne bryter på en linje med lav last samtidig som at en GIC-strøm flyter [10].

Merk at dette fenomenet kan sette begrensninger på omkoblinger en kan foreta under en GIC-hendelse, for eksempel hvis en velger å prøve å beskytte en komponent eller å stoppe GIC-strømmens bidrag fra en linje.

### 3.9 Vern måler feil strøm på grunn av harmoniske

Måleprinsipp for strøm i enkelte vern kan gjøre at vernet måler feil når en har høyt innhold av harmoniske fra transformatorer i metning. Typisk vil en kunne måle en høyere strøm enn det som faktisk flyter hvis måleprinsippet baserer seg på toppverdier. Dette vil kunne gi utløsning og frakobling uten at det egentlig er nødvendig. Unødvendig utkobling vil kunne bidra til forhøyet risiko for kollaps, siden dette vil kunne gi økt belastning på andre deler av kraftsystemet og siden utkoblinger gir transienter som kan være kritisk hvis en allerede ligger nært grensen for hva systemet tåler.

I henhold til informasjon fra Statnett så er dette er i praksis et nærmest ikke-eksisterende problem i det norske transmisjonsnettet da det generelt er benyttet moderne vern som baserer seg på måling av grunnfrekvente strømmer og/eller spenninger. Unntaket er overlastvern for kondensatorbatterier. For å beskytte kondensatorbatteri mot overlast er disse bevisst valgt med måling som inkluderer overharmoniske strømmer (se også avsnitt 3.7).

### 3.10 Metning av spenningstransformatorer (måletransformatorer)

Måletransformatorer som utsettes for DC-strøm vil i prinsippet kunne gå i metning på eksakt samme måte som krafttransformatorer. I transmisjonsnettet hvor GIC utgjør en utfordring benyttes imidlertid i hovedsak kapitative måletransformatorer. Kondensatorene i disse vil blokkere DC-strømmen slik at metning unngås. Det vil også være begrenset med GIC-strøm i induktive spenningstransformatorer siden disse er viklet med veldig tynne ledere sammenlignet med krafttransformatorer. Resistansen blir derfor betydelig høyere og dermed vil GIC strømmene bli små sammenlignet med de som vil kunne flyte i krafttransformatorene.

### 3.11 Metning av strømtransformatorer

En GIC-strøm som flyter gjennom en strømtransformator vil drive denne mot metning i annenhver halvperiode på samme måte som i krafttransformatorer. Konsekvensene er imidlertid ikke så store. GIC-strømmene vil være små sammenlignet med de feilstømmer som vernene er satt inn for å måle og det er allerede tatt hensyn til at høye, asymmetriske feilstømmer vil kunne drive strømtransformatorene i metning. [17] konkluderer derfor med at GIC-indusert metning i strømtransformatorer vil ha begrenset påvirkning av vernene som benytter målinger fra disse.

GIC-strømmene kan riktignok ha en varighet som langt overgår varigheten av DC-komponenter under feilsituasjoner. Dette spiller imidlertid ikke noen rolle for grad av metning siden. En konstant DC-strøm over lang tid vil gi en konstant forskyvning av magnetiseringen og vil ikke gi mere metning om den står på over tid. Dette i motsetning til hvis en påtrykker en DC-spenning. Da vil transformatoren drives mer i metning jo lengre spenningen påtrykkes.

### 3.12 Generatorer

#### 3.12.1 Tilleggstep i generatorer

Generatorer vil typisk være skjermet for GIC-strømmen som sådan hvis de er koblet til transmisjonsnettet via en transformator med minst én trekantkobling (Dy eller DD).

Generatorene vil imidlertid ikke være skjermet for harmoniske strømmer grunnet metning i egen transformator eller i andre transformatorer i nettet. Deltakobling mot nettet vil skjerme den fra harmoniske i nullsystemet [17], men både positive og negative roterende harmoniske vil nå frem til generatorklemmene siden generatoren vil ha lav impedans for disse sett i forhold til andre veier de harmoniske kan ta. Videre, de harmoniske forårsaket av GIC vil ikke være symmetriske. Dette medfører i henhold til [17] at harmoniske i både det positive og negative system vil ha en effekt på generatorer tilsvarende negativt roterende grunnharmoniske. Det vil si, de bidrar med tilleggstep i generator, og da spesielt i dempeviklinger. Ubalanserte harmoniske vil resultere i positive og negative komponenter påvirker hverandre og kobler over til nullsystemet.

Harmoniske i en generator vil sette opp magnetfelt som roterer i forhold til rotor (ikke synkront med rotor). Dette gjelder både positive og negative roterende harmoniske. Magnetfeltene disse setter opp vil sette opp hvirvelstrømmer i rotor og dempeviklinger/dempestaver siden disse vil oppleve et tidsvarierende magnetfelt når rotor roterer. (Positivt roterende grunnharmoniske strømmer vil på sin side sette opp et felt som oppleves konstant sett fra rotor og vil følgelig ikke indusere hvirvelstrømmer). Hvirvelstrømmene fra de harmoniske vil i sin tur gi økt temperatur i rotor. Ved moderate temperaturstigning i løpet av den tiden GIC-strømmene forårsaker harmoniske kan dette gi svekket isolasjon i rotorviklinger. Ved høy temperaturstigning kan imidlertid denne gi havari grunnet mekanisk svekkelse av innfesting av rotorviklinger og på grunn av ødelagt isolasjon på feltviklinger.

Konsekvensen av oppvarming fra harmoniske vil være størst for en hardt belastet generator hvor margin til maksimum tillatt temperatur er minst.

Generatorer er designet til å tåle en viss mengde negativt roterende grunnharmonisk (50 Hz). En metode for å beregne effekten av harmoniske er å regne disse til en ekvivalent negativt roterende grunnharmonisk som har ekvivalent termisk effekt på generatoren som det de harmoniske har. Dette gjøre det mulig å vurdere hvor mye harmoniske generatoren vil kunne tåle. Omregningen er i henhold til [17] beskrevet i IEEE Standards C50.12 22 and C50.13 23. Utfordringen er imidlertid at det er vanskelig å estimere hvor mye harmoniske generator vil bli utsatt for, samt at det ikke nødvendigvis er kjent hvor mye negativt roterende grunnharmonisk den tåler.

I referanse [18] har forfatterne gjort beregninger for en spesifikk generator som viser at en GIC-strøm på 50 A per fase eller høyere vil gi så mye harmoniske fra generator transformator at termisk belastning på generator blir høyere enn det generator er designet for. Eksemplet i denne referansen er dog ikke direkte sammenlignbart med norske forhold siden det er en 892 kVA turbogenerator som mater inn på en 500 kV linje via tre enfase-transformatorer. I eksemplet er den dessuten koblet til en ikke-transponert linje slik at en i utgangspunktet har betydelig termisk belastning på generator som følge usymmetrisk spenning. Eksemplet viser imidlertid GIC-strømmer kan gi signifikant ekstra termisk belastning på generatorer.

Generatorer koblet til en transformator med et jordet nullpunkt er mest utsatt siden en da vil kunne få metning i den nærmeste transformatoren, men harmoniske fra andre transformatorer vil også kunne finne veien inn i generator selv om disse da vil møte en større impedans på veien. Merk forøvrig at en generatortransformator med trekantkobling ikke på noen måte beskytter generatoren mot den termiske merbelastning fra harmoniske. Trekantviklingen stopper riktignok GIC DC-strømmen, men DC-strømmen er ikke utfordringen for generatorene. For generatorene er utfordringen termisk belastning fra de harmoniske som genereres i transformatorene som utsettes for GIC-strøm.

Her må det påpekes at det i henhold til [17] ikke er dokumentert at GIC-harmoniske har medført signifikant skade på generatorer som følge av forhøyede tap.

### 3.12.2 Mekanisk resonans i generatorer

Som beskrevet i forrige avsnitt så vil de harmoniske sette opp magnetfelt som gir hvirvelstrømmer i rotor. Dette vil også gi tilsvarende pulsasjoner i moment som potensielt kan trigge mekaniske resonanser i generator/turbin. Generatorer er normalt designet slik at resonanser ikke oppstår for negativt roterende grunnharmoniske og for 5. og 7. harmoniske som normalt er de største harmoniske en finner i nettet. GIC-strømmer forårsaker imidlertid mer ikke-karakteristiske harmoniske som kan trigge dårlig dempede mekaniske svingemodi [17]. Dette kan se ut til å først og fremst være et potensielt problem for turbogeneratorer for gass og dampturbiner som gjerne er lange komplekse akslinger med mange høyfrekvens resonanser.

### 3.12.3 Økt reaktiv effektflyt i generator

GIC gir økt behov for reaktiv effekt i det transformatorer går i metning. Dette vil gi seg utslag i redusert spenning, som igjen vil bli plukket opp av spenningsregulatorer på generatorer som vil prøve å opprettholde spenningen. Feltstrømmen på generatorer vil derfor automatisk bli regulert opp slik at disse leverer den nødvendige reaktive effekt som trengs for å opprettholde spenningen.

Dette betyr økt strøm i generatorer, med tilhørende økte tap og økt temperatur. I utgangspunktet vil generatorvern og begrensninger i spenningsregulator sørge for at generatoren ikke belastes mer enn at temperaturene holdes på akseptabelt nivå. Generatorvernene tar imidlertid ikke nødvendigvis hensyn til den ekstra oppvarming som harmoniske gir på samme tid når en har GIC. Høy reaktiv effektflyt i generator under GIC øker derfor faren for at harmoniske under GIC kan gi farlig høy temperatur. Ytterligere bidrag til høy temperatur vil en kunne få hvis spenningsregulatoren ikke klarer å opprettholde full spenning. Da vil strøm og dermed tap i generator øke for samme leverte aktive effekt.

Merk at det heller ikke er ønskelig at vern stilles inn konservativt for å beskytte en generator slik at denne kobles ut unødig tidlig for å beskytte den mot høy temperatur. Generatorene er viktige for å kompensere både for økt reaktivt forbruk i egen transformator og andre transformatorer i nettet under en GIC-hendelse, og dermed også for å opprettholde stabiliteten i nettet.

### 3.13 Vindparker på land

Ettersom vindparker øker i ytelse vil de være koblet tettere opp mot transmisjonsnettet. Det er neppe noen risiko for at det flyter vesentlig med DC-strøm ut til hver enkelt turbin, men vindparken vil bli påvirket hvis transformator mot overliggende nett blir utsatt for GIC-strømmer. Hvis transformatoren mot det overliggende nettet er jordet på høyspenningssiden vil denne kunne gå i metning under en solstorm. Da vil transformatoren trekke stor magnetiseringsstrøm med høyt innhold av harmoniske. Disse vil finne minste motstands vei, noe vil trekkes fra høyspenningsnettet og fra vindparken.

Økt reaktivt forbruk i transformator vil dessuten kunne trekke spenningen i parken ned. Hvis omformerne er satt opp til å støtte spenningen med reaktiv effekt vil disse da få økt belastning. Samtidig vil parken bli utsatt for vesentlig økning i harmoniske med muligheter for økte tap og høye temperaturer. Større, moderne vindturbiner er koblet til nettet via kraftelektronikkomformere. Dobbeltmatet asynkronmotorer med omformermatet rotorvikling benyttes også. Disse kan være utrustet med filter på utgangen. Dette filteret vil kunne fremstå som en lav impedans for harmoniske. Imidlertid er det vel normalt i hver turbin en transformator mot samlenettet i vindparken som vil skjerme filteret noe fra harmoniske på nettsiden. Det er derfor ikke gitt at harmoniske på det interne nettet vil gi vesentlige tilleggslag, men dette kan ikke utelukkes.

Både harmoniske og redusert spenning grunnet høyt reaktivt forbruk i transformatorer kan trigge vern i vindturbinene slik at disse kobler seg fra. Dette vil ikke være ønskelig siden det vil kunne bidra til destabilisering av kraftsystemet.

Effekten av GIC på vindparker er ikke mye omtalt i litteraturen, men en nylig artikkel [21] tar for seg dette og konkluderer med at vindparker kan bli påvirket. Naturlig nok vil transformator mot overliggende nett kunne bli utsatt for samme termiske påkjenninger som andre transformatorer i nettet. Samtidig viser artikkelen at GIC kan gi betydelig harmoniske strømmer internt i vindparken. Disse kan som sagt både gi tilleggslag og uønsket utkobling av produksjon.

GIC vil først og fremst kunne være et problem for vindparker som kobles opp mot de høyeste spenningsnivåer siden det er normalt å anta at GIC er et mindre problem for spenningsnivå under 200 kV grunnet kortere overføringer og høyere DC-resistans (se avsnitt 6.3).

### 3.14 Lange AC-kabler til offshore vindparker og offshore olje og gassinstallasjoner

Normalt er ikke kabler fokusert i forbindelse med GIC. Dette fordi disse gjerne har mye kortere lengde enn luftlinjer. Det er funnet minimalt med litteratur som overhode nevner kraftkabler i forbindelse med GIC.

I forbindelse med offshore vind og elektrifisering av olje og gassvirksomhet ser en imidlertid at lengden på AC-kabler strekkes. Kombinasjonen lang overføring og stort kobberversnitt på lederne gjør at det kan bli induisert betydelig DC strøm hvis nøytralpunktet er koblet til jord/sjø i begge ender. Slike lange overføringer har dessuten ofte shuntreaktorer mot jord som også gir en vei for GIC-strømmene.

Eksempelvis vil DC-resistans ligge i området 0.015 Ohm/km for en 1200 mm<sup>2</sup> kobberkabel. Hvis en for eksempel legger til grunn 7 Volt per km drivende spenning for GIC gir dette for en 100 km lang kabel 466 A per fase hvis en ser bort fra resistans i transformator og overgangsmotstand mot jord. Virkelig DC-strøm vil nok bli vesentlig lavere hvis en tar med resistans i transformator og overgangsmotstand. Drivende spenning vil typisk også være lavere grunnet høy konduktivitet i sjø, men denne overslagsberegningen viser at en ikke uten videre kan utelukke at man ved etablering av kabler til fremtidige offshore vindparker og andre installasjoner bør vurdere mulige konsekvenser av GIC-strømmer.

Sjøkabler vil i noen tilfeller bli ført langt inn over land. Det er kjent at drivende spenning for GIC kan være vesentlig forhøyet i grenseområdene mellom sjø og land ("Coastal effect") [30]. Dette vil en også måtte ta med i betraktningen.

Konsekvensen av GIC-strømmer i kabler vil være mye den samme som beskrevet for vindturbiner på land. Transformatorene i hver ende kan drives i metning slik at en for eksempel offshore vil kunne få høyt innhold av harmoniske som kan skape problemer (tilleggstap og uønsket utkobling)

For sjøkabler kan en heller ikke utelukke betydelig DC-strøm i skjerm og kappe hvis denne er jordet i begge ender. Det er ikke funnet noe litteratur som har kommentert hvorvidt dette kan ha konsekvenser. Skjerm og kappe vil for øvrig kunne ha en skjermende effekt for GIC i faselederne. Dette er i hvert fall sagt å være tilfelle for kabler omsluttet av stålrør.

### 3.15 Påvirkning av kommunikasjon

Moderne kommunikasjonslinjer vil ikke være utsatt for GIC på samme måte som tidligere tiders telegraf og telefonlinjer. Det er derfor ikke ansett å være noen stor risiko for at GIC vil påvirke kontrollsignaler.

Det er imidlertid ett unntak. Satellitter vil kunne påvirkes av solstormer og en må derfor ta høyde for at systemer basert på PMU-er og andre instrument som baserer seg på tidsstempel fra GPS kan midlertidig miste tidssignal under en solstorm. Dette kan være kritisk hvis en benytter PMU-er for stabilisering av kraftsystemet siden det også gjerne er ekstra påkrevet med stabilisering under en solstorm.

Konsekvenser og beskyttelse mot forstyrrelser i kommunikasjonssystemer for øvrig er utenfor rammene for det som behandles i denne rapporten.

### 3.16 Ustabilitet i spenning

En av utfordringene med solstormer er at de påvirker kraftsystemet samtidig over store områder. Det betyr at mange transformatorer vil kunne trekke forhøyet reaktiv effekt samtidig. Dette reduserer systemspenningen og stabilitetsmarginene. Hvis en også samtidig får utkoblinger av reaktiv kompensering eller produksjonsenheter kan det i verste fall føre til ustabilitet og spenningskollaps med påfølgende utkoblinger.

### 3.17 Overbelastning av overføringer og komponenter

Som det fremgår av de foregående avsnittene, vil GIC gi økt reaktivt forbruk og mulige utkoblinger av utstyr. Dette vil gi endret lastflyt i nettet, noe som kan gi overbelastning av enkelte komponenter eller linjer. Dette kan trigge en kaskadeeffekt hvor flere linjer og enheter kobler ut, med økt belastning for de resterende og fare for ytterligere utkoblinger. En slik situasjon kan resultere i blackout.

Utkoblinger påvirker også GIC-strømmene siden utkoblingene endrer mulige veier for GIC-strømmene. Dette kan forsterke de uønskede effekter, siden utkobling av en transformator som fører GIC-strøm kan medføre at mere GIC-strøm flyter i en nærliggende transformator. Da vil denne drives ytterligere i metning og problemene kan forsterkes.



## 4 MULIGE TILTAK FOR Å MOTVIRKE KONSEKVENSER AV SOLSTORMER

### 4.1 Hovedprinsipper

Konsekvensen av solstormer kan reduseres gjennom å gjøre kraftsystemet mer motstandsdyktig for konsekvensene eller gjennom å prøve å begrense likestrømmene som solstormene setter opp. I

Figur 11 er det forsøkt illustrert hvor det er mest aktuelt å angripe problemet for å bryte koblingen mellom solstormer og uønskede, alvorlige hendelser i kraftnettet.

På et overordnet nivå kan en si at en har følgende alternativer:

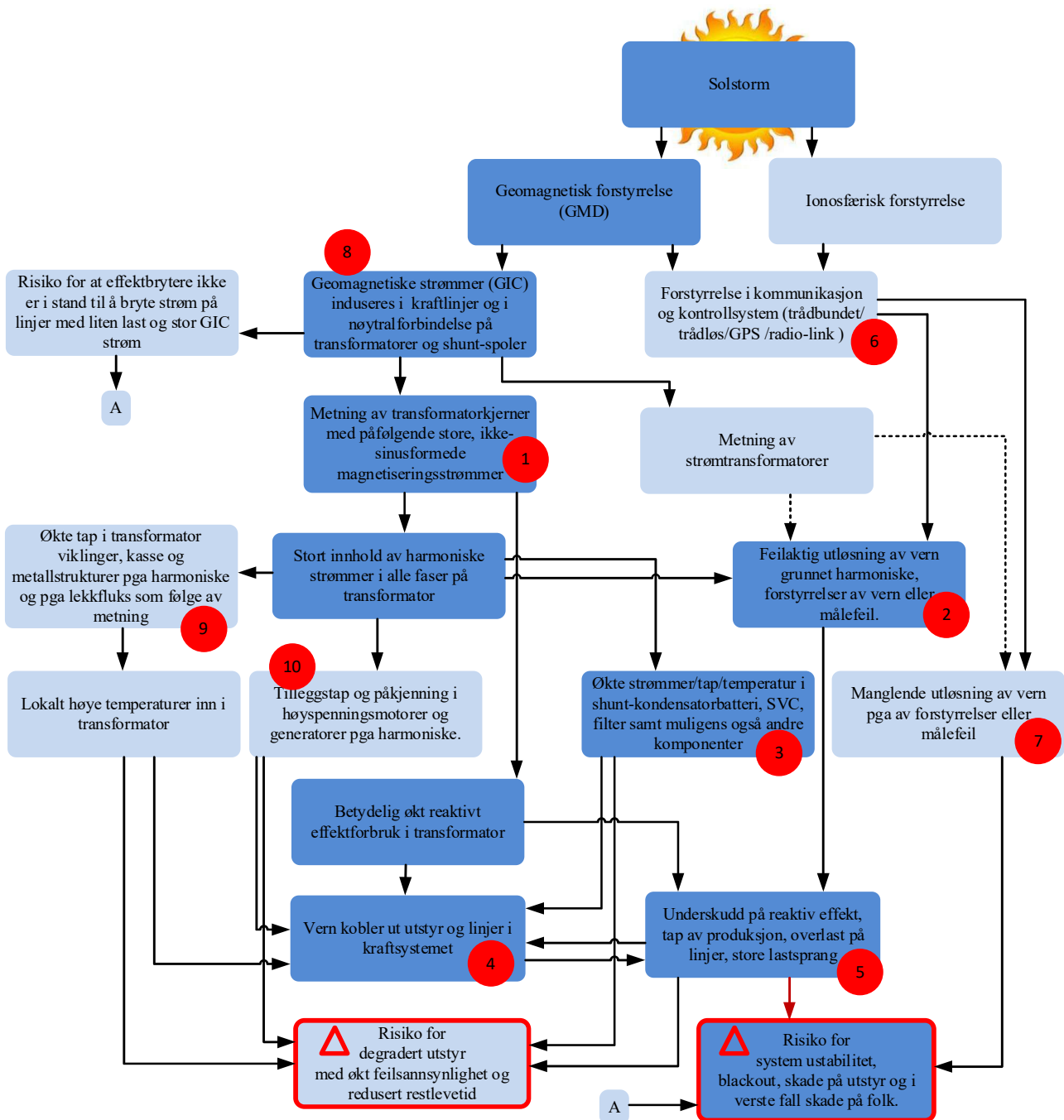
Redusere GIC-strømmene:

- Installere komponenter som blokkerer eller reduserer GIC-strømmene (angrepspunkt 8 i Figur 11).
- Drifte nettet på en slik måte at en begrenser amplituden på de likestrømmer som solstormene forårsaker (angrepspunkt 8 i Figur 11).

Øke motstandsdyktighet:

- Operere nettet under solstormer på en slik måte at en har rikelige stabilitetsmarginer med aktive og reaktive reserver for å håndtere forhøyet reaktiv effekt og mulige utkoblinger uten at en får kaskadeutkoblinger på grunn av overlast (angrepspunkt 4 og 5 i Figur 11).
- Sørg for at transformatorene ikke så lett går i kraftig metning på grunn av DC-strømmer slik at harmoniske og forhøyet reaktivt effektbehov reduseres (angrepspunkt 1 i Figur 11).
- Sørg for at transformatorene tåler forhøyede tap som følge av GIC uten at en får skadelig høye temperaturer (angrepspunkt 9 i Figur 11).
- Sørg for at alle vern er riktig koordinert slik at en ikke får uønsket (kaskade) utkobling på grunn av forhøyet innhold av harmoniske og forhøyet reaktiv effektflyt (angrepspunkt 2,3 og 4 i Figur 11).
- Drifte og dimensjonere nettet slik at komponenter ikke så lett overbelastes ved høyt innhold av harmoniske (angrepspunkt 3,4,5, 9 og 10 i).
- Sørg for at det er tatt høyde for atmosfæriske forstyrrelser i design av kontrollsystemer og kritisk kommunikasjon (angrepspunkt 6).
- Drifte nettet med midlertidig tillatt høyere belastning på kritiske systemkomponenter under solstormer for å unngå utkoblinger (angrepspunkt 4).

I det følgende vil en forklare nærmere hvordan dette kan gjøres.



Figur 11: Illustrasjon av hvor de mest aktuelle tiltak kan settes inn for å håndtere risiko som følge av GIC.

## 4.2 Tiltak for å begrense størrelsen på DC-strømmene

(Angrepspunkt 8 i Figur 11).

### 4.2.1 Passiv blokkering eller reduksjon av nullpunktstrøm

Det er mulig å installere passive elementer for å blokkere eller redusere likestrøm i nullpunktet. Både motstander og kondensatorer kan benyttes.

#### 4.2.1.1 Resistans i nullpunkt

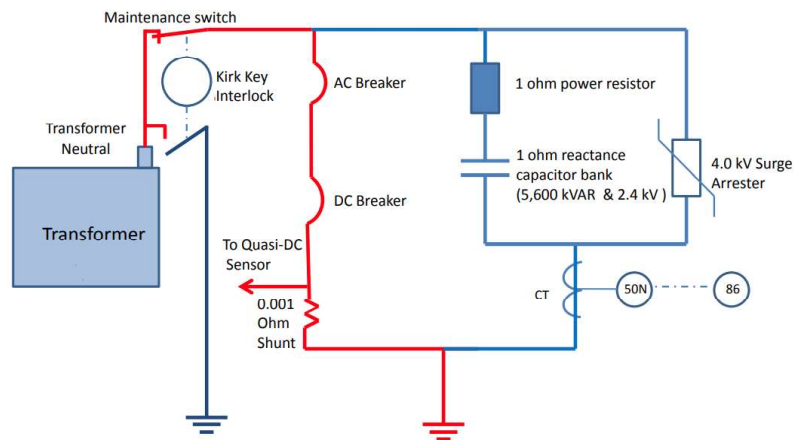
En resistans i nullpunkt vil redusere DC-strømmen. Siden drivende kilde i kraftledningen er et elektrisk felt så vil økt motstand gi redusert strøm. I følge [6] så kan typisk en motstand i størrelsesorden  $2 - 5 \Omega$  være tilstrekkelig i et 60 Hz nett. Sannsynligvis vil det være noe tilsvarende i et 50 Hz nett. Optimal verdi vil avhenge av flere faktorer, inkludert også systemspenning. Motstanden kan enten være innkoblet permanent eller kun når en forventer GIC. Hvis den skal stå permanent må den tåle den termiske belastning dette medfører, både i normaldrift og under feil i nettet.

#### 4.2.1.2 Kondensator i nullpunkt

Med en kondensator i nullpunktet vil en få en mer effektiv blokkering av DC-strømmen enn en motstand. Impedansen ved 50 Hz må imidlertid ikke være for høy siden det vil påvirke normaldrift. I henhold til [6] så har det vært foreslått å benytte en kondensator rundt  $60 \mu\text{F}$  i 60 Hz nett (optimalt valg vil nok avhenge av spenningsnivå). En kondensator krever imidlertid en forbikobling som kan kobles inn hurtig i tilfelle feil i kraftsystemet. Dette kompliserer anlegget, samt introduserer nye muligheter for feil. En må dessuten være veldig nøye med valg av kondensator for ikke å introdusere farlige resonanser.

I følge [10] så vil en kunne sette inn kondensator som effektivt vil kunne redusere GIC-strømmer med periodisitet i området 0.001 til 0.1 Hz (GIC periodetider på 10 s og oppover)

Det finnes kommersielt tilgjengelige systemer for GIC-kondensator i nullpunkt. Disse er basert på direktejordet nøytralt punkt under normal drift. Kondensator kobles inn dersom systemet oppdager DC-flyt. Gnistgap benyttes for sikre "direktejording" dersom det oppstår jordfeil i nettet mens kondensator er innkoblet.



Figur 12: Prinsipp for kommersielt tilgjengelig utstyr for bruk av kondensator til å blokkere GIC-strøm. Ved detektert GIC-strøm ledes nøytralstrøm gjennom kondensator, samtidig som en har sikker forbikobling i tilfelle kortslutning i nettet (figur fra [31]).

#### 4.2.1.3 Midlertidig isolering av nøytralpunkt

Et mulig tiltak er å installere bryter slik at midlertidig kan kjøre med isolert nullpunkt (altså svært stor impedans). Dette vil effektivt blokkere for GIC-strømmer i transformatoren, men vil ha store konsekvenser ved andre feil og transienter. Se avsnitt 4.2.1.5 om utfordringer ved passiv blokkering.

#### 4.2.1.4 Spolejordet nøytralpunkt

Induktansen i en spole i nullpunktet har ikke noen god effekt mot GIC. Induktansen vil ikke blokkere for GIC siden GIC-strømmen er å betrakte som tilnærmet en likestrøm og for likestrømmer vil induktansen representere en lav impedans.

Spolen vil derimot ha en betydelig motstand, opplyst av Statnett til å være i området 2-3 Ohm. Denne vil bidra til å redusere DC-strømmen.

I det norske nettet benyttes Petersenspoler for lavere spenningsnivåer hvor GIC ikke er betraktet som kritisk (132 kV og lavere). I Finland benyttes det ifølge Statnett en del lavohmige nullpunktsreaktorer for å begrense fase-jord kortslutningsstrømmer på høyere spenningsnivå. Resistansen i disse vil bidra til å redusere GIC-strømmene.

#### 4.2.1.5 Utfordringer med passiv blokkering

Det er ikke uproblematisk å installere en impedans i nullpunktet siden det vil kunne medføre høy nullpunktspenning ved feil og transienter. En må derfor også samtidig sørge for at man har tilstrekkelig beskyttelse mot høy spenning i nullpunktet.

Bruk av passive elementer er generelt krevende og ifølge [6] er dette en kostbar vei å gå siden en vil måtte beskytte hver enkelt transformator som har jordet nøytralpunkt. Hvis ikke vil beskyttelse av en transformator lett medføre at det går tilsvarende mer strøm i en annen ubeskyttet nærliggende transformator.

Andre tiltak betraktes som mer fornuftige enn å montere passiv blokkering.

#### **4.2.2 Aktiv regulering av DC-magnetisering via egen transformatorvikling**

En kan også tenke seg at en installerer aktive elementer som motvirker effekten av GIC-strømmen ved at man injiserer en likestrøm som gir en DC-fluks motsatt den som GIC setter opp. Dette kan gjøres ved å påtrykke DC-strøm i en dedikert ekstra vikling på hvert bein i transformatoren. Dette er imidlertid ifølge [6] konkludert med at dette ikke er en praktisk strategi for å motvirke konsekvenser av GIC. En vesentlig ulempe er dessuten at disse viklingene må settes inn allerede når transformatoren bygges.

#### **4.2.3 Aktiv regulering av DC-magnetisering ved hjelp av kraftelektronikk**

I prinsippet er det også mulig å montere kraftelektronikk mellom nøytralpunkt og jord som så settes opp til å regulere DC-strømmen til null (setter opp en spenning som akkurat balanserer det elektriske felt langs linja). Her vil det imidlertid også være utfordringer med at utstyret vil bli utsatt for høy spenning ved feil i nettet slik at forbikobling vil være nødvendig.

Et eksempel på en løsning i denne kategorien er Semiconductor GIC Reducer (SGICR) som er beskrevet og analysert i [22].

#### **4.2.4 Seriekompensering av kraftlinjer**

Seriekompensering i form av kondensatorer på kraftlinjer vil effektivt blokkere for GIC-strømmer i kraftledningene. Installasjon av seriekompensator er imidlertid dyrt og omfattende og vil neppe være aktuelt tiltak med mindre man har detektert et betydelig problem på en gitt linje. Der hvor en av andre grunner har installert seriekompensering vil det imidlertid normalt være gunstig at disse ligger inne når solstormer er varslet for slik å blokkere GIC-strømmene i denne linjen.

Her er det imidlertid viktig å merke seg at det i litteraturen er vist eksempler på at man i enkelte nettkonfigurasjoner risikerer større GIC-strømmer i transformatorer hvis seriekompensering ligger inne. Det er derfor viktig at simuleringer benyttes for å vurdere hva som er best.

### **4.3 Systemforbedringer for å være bedre forberedt**

#### **4.3.1 Vern**

(Angrepspunkt 2, 3 og 4 i Figur 11).

Et viktig tiltak er å sørge for å skifte ut eventuelle vern på kondensatorer og SVC-anlegg som baserer seg på måling av toppverdier siden disse kan gi unødig utkobling ved høyt harmonisk innhold. Det samme gjelder for differensialvern på andre komponenter. Moderne vern kan måle både grunnharmonisk og rms-verdi uten å basere seg på toppverdiene. Dette gir mulighet for mer presis utløsning som ikke er unødig følsom for overharmoniske.

Videre kan en sørge for at vern mot asymmetrisk belastning av filter og kondensatorbatterier er immune mot harmoniske i nøytralpunktstrøm. Metning i transformator forårsaket av GIC kan gi nullsystemharmoniske som vil kunne ta veien gjennom nøytralpunkt på kondensatorbatterier. En må derfor unngå at slike harmoniske i nøytralpunktstrøm blir tolket som om at en har feil i en av fasene i kondensatorbatteriet med påfølgende utkobling. Dette skal ifølge Statnett være ivarettatt i Norge.

Et tiltak kan også være å kartlegge om en kan tillate seg at noen vern stilles høyere, eller at noen vern kobles ut rett før og under en GIC-hendelse. Hvis slike muligheter identifiseres kan en legge opp til at disse vernene på kort varsel kan endres.

### 4.3.2 Generatorvern

(Angrepspunkt 2 og 4 i Figur 11).

Som nevnt i forrige kapittel så vil GIC kunne gi kraftig økt harmoniske i generatorer. For generatorer vil det være viktig å:

- Verifisere at det er tatt tilstrekkelig høyde for harmoniske under GIC slik at termisk beskyttelse av generatoren er tilstrekkelig.
- Verifisere at vern ikke vil koble ut generatorer unødvendig tidlig på grunn av strømmålinger som påvirkes av harmoniske.

Det første punktet vil redusere risiko for skade på generator mens det siste vil redusere sjansen for stabilitetsproblem og kollaps i kraftsystemet.

### 4.3.3 Online overvåkning av harmoniske

Økning i harmoniske er indikasjon på at en GIC-hendelse pågår. Automatisk varsling av økte harmoniske i nettet (inkludert like harmoniske) kan derfor gi viktig informasjon til operatører om at skadeforebyggende tiltak bør settes i verk. Her vil det billigste være å utnytte målinger i eksisterende vern hvis slik finnes.

NERC har forøvrig også utviklet utstyr for trådløs måling av harmoniske strømmer inn i transmisjonstransformatorer.

### 4.3.4 Online overvåkning av reaktiv effektflyt og spenning

Atypisk reaktiv effektflyt og unormale fluktuasjoner i spenning kan være indikasjoner på at GIC-strømmer flyter i systemet. Systemer for automatisk varsling av slike situasjoner kan bidra til at operatører i tide kan sette inn tiltak for å redusere risiko.

### 4.3.5 Ekstra målinger på transformatorer

I dag finnes kommersielt utstyr beregnet for måling av GIC-strømmer i transformatorers nøytralpunkt [23][24]. Installasjon av slikt utstyr vil gi bedre innsikt i hvor en har GIC-strømmer av betydning. Det gjør det også mulig å tidlig bli oppmerksom på at noe er på gang slik at en tidligere kan iverksette tiltak for å motvirke konsekvenser. Målinger vil også være nyttige for å validere beregninger og/eller simuleringer.

Hvis en ønsker ytterligere overvåkning for fange opp at noe skjer kan en også installere:

- Ekstra temperaturmålinger, dog vanskelig for eksisterende transformatorer.
- Sensorer for å fange opp økt akustisk støy som oppstår når transformator går i metning.
- Måling av harmoniske i strømmer og spenninger både på høy og lavspenningsside.
- Reaktiv effektflyt både på høy og lavspenningsside.

#### 4.3.6 Sette krav til nye transformatorer

(Angrepspunkt 1 og 9 i Figur 11).

Transformatorer kan konstrueres slik at de bedre tåler DC-strømmer. I praksis betyr dette sannsynligvis økt kost siden en må inn med mere eller bedre kjernemateriale. Valg av kjernekonstruksjon (tre bein versus fem bein) er også en faktor man kan spille på. Videre gjelder det å konstruere transformator slik at ikke lokalt inne i transformator får ekstrem oppvarming når den går i metning (unngå metallkonstruksjoner der magnetfeltene blir størst)

Hvilken maksimal DC-strøm transformator bør dimensjoneres for er ikke uten videre gitt. Dette avhenger av hva man definerer som dimensjonerende GIC-strøm (se avsnitt 6.3) for den lokasjon transformatoren skal installeres på.

Det er videre mulig å sørge for at nye transformatorer som en vet vil bli utsatt for høye GIC-strømmer utrustes med temperatursensorer på kritiske punkter slik at en kan koble disse ut før varig skade oppstår.

### 4.4 Operasjonelle tiltak i forbindelse med en solstorm

(Angrepspunkt 2, 3, 4, 5, 6, 9 og 10 i Figur 11).

En vil kunne få noe forvarsel om at en solstorm er nært forestående og en vil kunne få forvarsler om at noe er på gang basert på målinger i nettet. I det følgende beskrives hva man operasjonelt kan gjøre for å begrense konsekvensene.

Det følgende er i stor grad basert på anbefalinger gitt i [6], [12] og [14].

#### 4.4.1 Trigger for iverksetting av operasjonelle tiltak

Triggere for iverksetting av operasjonelle tiltak kan typisk være:

Varslet solstorm eller høy geomagnetisk aktivitet (se mere om dette i kapittel 0).

- Økt registrert GIC-strøm i transformatorer hvor det er montert utstyr for overvåkning.
- Økt målte harmoniske i nettet.
- Høy, atypisk eller fluktuerende reaktiv effektflyt.

Tiden man har til rådighet for å iverksette tiltak vil variere (se etterfølgende avsnitt). Lengst horisont har en naturlig nok ved varslinger. Når en måler aktivitet i nettet vil det raskt og når som helst kunne utvikle seg i en mer ugunstig retning.

#### 4.4.2 Operasjonelle tiltak ved varslet hendelse 1 – 3 dager frem i tid

Tiltak som settes i gang på 1 – 3 dagers forvarsel vil være trigget av varsel om solstorm. Slike varsel vil også inkludere estimat av hvor alvorlig denne ventes å bli. Basert på alvorlighetsgrad, kan følgende tiltak være aktuelle:

- Varsle operatører.
- Varsle personell om å være spesielt oppmerksom på, og rapportere uvanlige hendelser.
- Konfigurer systemet i henhold til hva analyser har vist er gunstig under solstormer.
- Senk temperatur i transformatorer hvis mulig (aktivere kjøling).
- Der det er mulig, koble inn igjen utstyr som er ute for vedlikehold, spesielt shunt-kondensatorer og SVC.
- Utsette vedlikeholdsjobber.
- Juster opp overstrømsvern som er følsomme for unødig utkobling (kondensatorbanker, SVC-er og filter). Dette vil være tidkrevende hvis det gjøres manuelt, men kan gjøres raskt hvis det er lagt opp til at det kan gjøres automatisert. Ulempen er at komponentene vil være mindre beskyttet i den perioden innstilling av vern er forhøyet.

#### 4.4.3 Operasjonelle tiltak timer før en ventet solstorm

Timer før en ventet solstorm kan det være aktuelt å følge på med følgende tiltak.

- Økt oppmerksomheten på:
  - Reaktive reserver.
  - Uvanlig endring i spenning, reaktiv effekt eller harmoniske.
  - Uvanlig temperatur i transformatorer, uvanlig lyd, økning i gass i transformatorolje.
  - Økt reaktivt effektforbruk i transformatorer.
  - Mulig vernutkobling av shuntkondensatorer.
  - Forstyrrelser av kontrollsystermer.
- Bringe systemet til ekstra sikker tilstand (kun hvis dette er underbygget av analyser):
  - Koble ut shuntreaktorer slik at en har større reserve av reaktiv effekt hvis transformatorer går i metning og trekker stor reaktiv effekt. Tiltaket kan typisk iverksettes på noen minutters varsel (hvis forsvarlig med hensyn på stabilitet og belastning).
  - Sørg for at seriekondensatorer er innkoblet. Merk dog at det kan finnes tilfeller hvor topologien tilsier at det er en fordel at seriekondensatorer kobles ut (se eksempel i [8]). Dette må være avklart på forhånd (Dette tiltaket har ikke relevans i Norge i dag siden en ikke har noen seriebatterier i drift).
  - Sørg for å koble inn roterende kompensatorer.
  - Hvis mulig, senk settpunkt for systemspenning [10]. Dette vil gi større margin mot metning i transformatorer. Dette frigir dessuten reaktiv effekt, men gir ekstra kostnad i form av økte serietap.



- Beskytt kritisk utstyr:
  - Minimer antall utkoblede linjer. En får mindre last på hver enkelt transformator og dermed mer margin mot overoppheting. Dette tiltaket kan kreve noen timers varsel hvis det er pågående arbeid på linjer.
  - Kjør flere generatorer for å redusere last på hver enkelt. Større margin mot overoppheting på grunn av harmoniske.
  - Vurder å koble fra kritisk utstyr som en vet fra tidligere erfaring er spesielt utsatt for GIC og påfølgende harmoniske. Dette vil være for å beskytte spesifikt utstyr, så som en transformator. Merk at dette vil kunne gjøre utfordringene større for andre deler av systemet siden GIC-strømmen da vil ta andre veier og fordi kraftsystemet sannsynligvis blir mindre robust mot økt reaktiv effekt og harmoniske. En slik aksjon vil være i konflikt med anbefalingen om å koble til mest mulig og bør utredes på forhånd.
  
- Markedsinngripende tiltak for sikker tilstand:
  - Start off-line reserver.
  - Sørg for at overføring mellom regioner ikke er lastet høyere enn 90 % slik at en har kapasitet for økt reaktiv effektflyt. Dette kan være problematisk siden en kan måtte gripe inn i markedet for kjøp og salg av kraft, inkludert utveksling til utlandet.
  - Reduser last på HVDC til 40-90 % for å redusere reaktivt forbruk. Dette vil først og fremst gjelde tyristorbaserte systemer (LCI) som har høyt lastavhengig reaktivt effektforbruk, men kan også være gunstig for å redusere forstyrrelsen en eventuell utkobling vil representere. Tiltaket vil kunne være problematisk siden det griper inn i markedet.
  - Reduser lasten på kritiske transformatorer for å sørge for å holde temperaturen nede. Dette kan kreve at det legges begrensninger på produksjon eller forbruk.

#### 4.4.4 Operasjonelle tiltak under selve solstormen

Under selve solstormen må en være forberedt på følgende ekstra tiltak, men kun hvis dette er underbygget av analyser på forhånd:

- Kontrollert utkobling av last.
- Oppstart av forsert kjøling av transformatorer for å ha bedre margin (forutsatt temp > 50°C).
- Koble ut transformator ved mistanke om høy temperatur.
- Koble ut spesifikke overføringslinjer hvis en vet det kan påvirke GIC i riktig retning.
- Minimer antallet koblinger i den perioden en har høy GIC for derigjennom å unngå ekstra transiente spenningsbelastninger på komponenter. Koblingsoverspenninger i kombinasjon med harmoniske kan gi høyere belastning enn normalt.

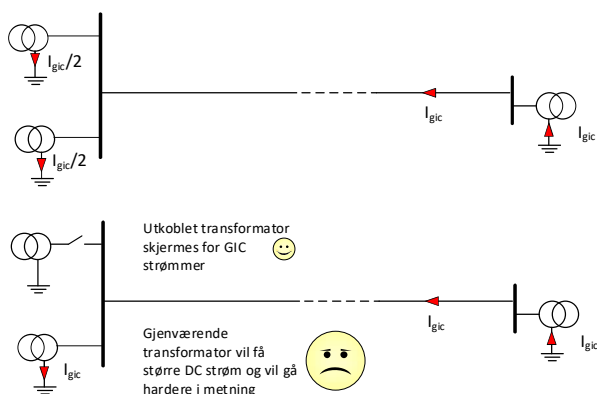
#### 4.5 Operasjonelle tiltak etter en solstorm

To til fire timer etter siste observerte påvirkning kan en returnere tilbake til normal drift.

#### 4.6 Eksempel på operasjonelle tiltak som kan ha uheldig effekt

Det kan være fristende å koble ut redundante transformatorer og linjer for derigjennom å skjerme disse fra en ventet solstorm. Motivasjonen kan være at en da iallfall vil ha en transformator uten skade, eller at en er spesielt bekymret for tilleggstrøm i en av dem. Dette er risikabelt av to grunner. For det første vil dette kunne gi høyere DC-strømmer i resterende transformatorer (se Figur 13), noe som vil bidra til hardere metning. Siden metning er et meget ulineært fenomen vil en da lett få betydelig mere reaktiv effekt og harmoniske enn om de to transformatorene hadde delt på DC-strømmen. Den andre ulempen er at skjerming av utstyr typisk medfører at nettet blir mindre robust mot eventuelle utkoblinger, harmoniske og økt reaktiv effektflyt.

Tilsvarende gjelder for andre komponenter. Det å koble vekk kondensatorbatterier for å skjerme disse mot eventuelle harmoniske vil for eksempel normalt være uheldig. Ved å koble vekk disse øker sjansen for underskudd på reaktiv effekt, og dermed også marginer mot stabilitetsutfordringer hvis transformatorer begynner å trekke mer reaktiv effekt eller hvis linjer kobler ut. Det samme gjelder for generatorer. Disse vil dele både laststrøm, reaktiv effekt og harmoniske. Jo flere å dele på, jo mindre belastning på hver av dem.



Figur 13: Forsøk på å skjerme en transformator fra metning ved å koble den ut kan fort straffe seg siden det i mange tilfeller kan gi forhøyet GIC strøm på gjenværende transformator som da vil gå ekstra hardt i metning og potensielt vil gi mye høyere harmoniske enn totalen ville vært med begge innkoblet. En vil dessuten sannsynligvis svekke nettet slik at det lettere blir ustabil.

## 5 Varsling av solstormer

### 5.1 Behovet for å forutse solstormer

Flere av de beskrevne mottiltak baserer seg på at en endrer driftsfilosofi under solstormer. Dette vil kun være mulig hvis en er i stand til å forutse når en kan forvente GIC-strømmer. Det er derfor i det følgende beskrevet hvilke muligheter en har for å forutse disse. Det må her påpekes at en uansett ikke kan basere seg på at en alltid vil få et tilstrekkelig forvarsel til at en kan iverksette tiltak.

### 5.2 Prognosering av solstormer

Prognose av romvær er mulig og deles inn i tre tidskategorier:

- Prognoser lengre enn noen dager, altså før partiklene har forlatt solen. Dette er ikke spesielt pålitelig og neppe anbefalt å bruke som basis for operasjonelle tiltak.
- Prediksjoner mellom noen dager før og ned til ca. 1 time før, altså etter partiklene er strålt fra sola, men før de har nådd romvær-satellittene. Dette er prediksjoner basert på elektromagnetisk stråling som vil sendes ut samtidig med at partikler sendes mot jorda. I og med at elektromagnetisk stråling har mye høyere hastighet enn partiklene kan man i noen grad estimere størrelsen på solstormen i forkant. Men dette er heller ikke spesielt pålitelig, og det er knyttet usikkerhet til om alle solstormer kan detekteres på denne måten.
- Målinger mindre enn 1 time før, altså etter at partiklene har nådd romværsatellittene. Det er nå minst to romværsatellitter, "Advanced Composition Explorer" (1997) og "Deep Space Climate Observatory" (2015). Disse er plassert mellom jorden og solen i en avstand som gir lik tyngdekraft mot jorden og solen og dermed følgelig mye nærmere jorda enn sola (avstand fra jorda er omtrent 1% av avstanden til sola). Satellittene vil kunne gi mye mer presist varsel om størrelsen på en innkommende solstorm. Tiden partiklene bruker fra satellittene til Jorden er mellom 15 og 60 min.

Under en solstorm vil en kunne innhente målinger som sier noe om størrelse og utbredelse av solstormen basert på:

- Magnetometer som måler magnetfelt og orienteringen på dette. Det er etablert et nettverk av magnetometer som måler magnetisk aktivitet rundt jorda. I Norge er det Universitetet i Tromsø som er ansvarlige, og de har målinger over 100 år tilbake i tid.
- Målinger av GIC-strømmer i nøytrale punkter. Statnett har installert måleutstyr for GIC-strømmer i et fåtall transformatorer. Disse vil gi direkte indikasjon på en pågående solstorm og størrelsen av denne.

### 5.3 Tjenesteleverandører

Varslinger kan innhentes fra kommersielle leverandører. Det finnes firmaer som har som leverer varslingstjenester for solstormer og forventet spenningspotensial, for eksempel Norwegian Centre for Space Weather i Trømsø [25], British Geological Survey [27] og Space Weather Prediction Center [33].

## 6 HÅNTERING AV RISIKO FORÅSAKET AV GEOMAGNETISK INDUSERT STRØM

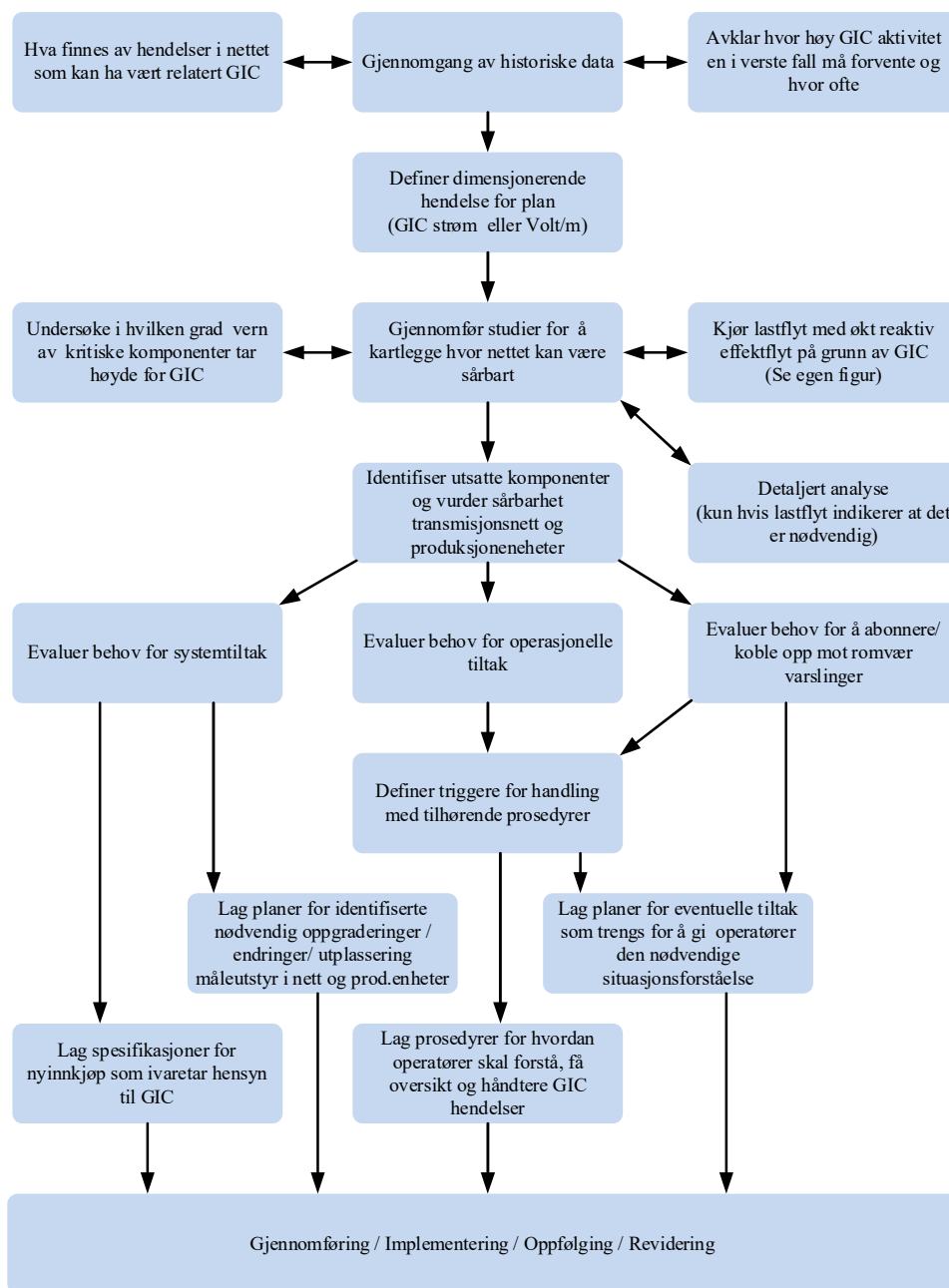
De anbefalinger som følger her er basert på anbefalinger fra litteratur, og da spesielt [7] fra North American Electric Reliability Corporation (NERC) og Electric Power Research Institute (EPRI) som har jobbet veldig mye med disse problemstillinger for Nord-Amerika. Rapportene fra NERC, og delvis EPRI ligger for øvrig åpent tilgjengelig på nett for den som vil gå mere i detalj.

### 6.1 Hovedprinsipp

Det viktigste vil være å kartlegge hvilken risiko GIC-strømmer representerer for det aktuelle system og at man er forberedt på å håndtere en slik situasjon. En foreslått fremgangsmåte i så måte er å følge flytskjemaet vist i Figur 14. De etterfølgende avsnitt utdyper de enkelte aksjoner vist i flytskjemaet.

Fysiske tiltak vil kunne være kostbare så det er viktig å først avklare om det faktisk er nødvendig med slike tiltak. Operasjonelle tiltak vil typisk være raskere og billigere å iverksette, men disse bør også kunne begrunnes. Det er derfor viktig at en først gjennomfører analyser for å kartlegge risikoen slik som flytskjemaet viser.

Det eksisterer en publisert studie som analyser det skandinaviske kraftsystemet [26]. Studien tar utgangspunkt i et høyt geomagnetisk induert elektrisk felt. Resultatene tyder på at et slikt nivå vil kunne ha store konsekvenser selv om forfatterne synes å mene noe annet. Denne studien gir imidlertid ikke grunnlag for å si hvorvidt tiltak er nødvendig. Det er kun regnet på et fåtall konfigurasjoner, og viktigst av alt, de har ikke hatt tilgang til eksakte data for kraftsystemene. Det er blant annet gjort rene antagelser med hensyn på distribusjon av produksjon og last. Studien viser imidlertid at hva som vil skje i Norge under GIC ikke er uavhengig av hva som skjer og hva man gjør i Sverige.



Figur 14: Illustrasjon av foreslått prosess for håndtering av risiko forårsaket av geomagnetisk induserte strømmer.

## 6.2 Gjennomgang av historiske data

Tidligere hendelser kan gi en indikasjon på sårbarhet ovenfor GIC. Innledningsvis anbefales det at en derfor går gjennom historiske data for å se om en har noen sammenheng mellom målte GIC-strømmer eller høy geomagnetisk aktivitet og hendelser av typen:

- Utkobling av kondensatorbanker.
- Utkobling av transformatorer.
- Utkobling av SVC, HVDC og lignende.
- Spenningsdipper og spenningsfluktuasjoner over 1%.
- Trip av generatorer.
- Uventet akkumulering av gasser i transformatorer (etter GIC-hendelser).

For en slik undersøkelse av historiske data vil en trenge historiske data for geomagnetisk aktivitet. Slike data kan for eksempel hentes fra Tromsø Geophysical Observatory [25], eksempelvis data som vist i Figur 18. En kan også benytte egne målinger i nullpunkt i kraftnettet der en har slike tilgjengelig.

Hvis en slik innledende undersøkelse indikerer en sammenheng mellom hendelser og målt geomagnetisk aktivitet/GIC, er dette en klar indikasjon på at en har sårbarheter ovenfor GIC. En må her huske på at amplitude og geografisk orientering og utstrekning på geomagnetisk aktivitet er nokså tilfeldig og kan variere veldig, samt at koblingssituasjon i nettet kan variere. En må derfor være forsiktig med å konkludere med at påvirkningene som observeres i historiske data er så ubetydelige at en ikke trenger å bekymre seg. Altså, finner man en sammenheng er det indikasjon på sårbarhet, men finner man ingen sammenheng indikerer det IKKE automatisk at alt er bra nok.

## 6.3 Bestemme dimensjonerende hendelse

For å kunne vurdere sårbarhet og nødvendige tiltak må en etablere et kriterium for hva systemet skal tåle. Dette kan enten være den GIC-strøm en skal planlegge ut fra eller alternativt hvilken feltstyrke (V/m) en må forvente.

Merk at hvis en tar utgangspunkt i feltstyrke må en benytte modeller for å regne seg frem til hvilke GIC-strømmer en da vil måtte planlegge for.

Et av de første stegene i en plan vil være å bestemme hva som skal være dimensjonerende GIC-strøm for kraftsystemet og så se om disse vil utgjøre noen risiko. Dette krever da at en har en ide om hvilke elektriske felt (V/km) en kan forvente og med hvilken orientering samt hvor hyppig de største feltstyrker oppstår. Eksempelvis kan man ta hensyn til en hundreårsstorm. Her må en koordinere i forhold til hva man ellers planlegger og tar høyde for ved risikovurderinger av transmissjonsnettet.

Alternativt kan en prøve å regne seg bakover å se hvilket elektrisk felt som er nødvendig for å skape utillatelig hendelser i nettet, og så håpe at svaret er et så høyt tall at en dermed kan utelukke at noe alvorlig kan skje.

Som tidligere nevnt har Statnett fått utført beregninger som kan være et utgangspunkt (se kapittel 2.2).

## 6.4 Lastflytberegninger

Neste steg vil være å kjøre tradisjonell lastflyt for å vurdere om det trengs mere detaljerte analyser. I henhold til [7] er det innledningsvis tilstrekkelig å forholde seg til overføringer med spenningsnivåer over 200 kV. Begrunnelsen for ikke å inkludere lavere spenningsnivåer er at disse er kortere (gir lavere drivende spenning) samt at DC-resistans i linjer og jordingsanlegg for lavere spenninger typisk vil være vesentlig høyere [8]. Dette er begrunnet ut fra den gjengitte tabellen i Tabell 1. Spenningsnivåene er ikke helt representativ for Norge, men konklusjonen vil være den samme. I Norge er 300 og 420 kV de høyeste spenningsnivåene. I henhold til REN sin Planbok er DC-resistans på linjer som for disse spenningsnivå i området 0.036 (Feral 506 Falcon) til 0.07  $\Omega/\text{km}$  (Feral 240 26/7). I GIC-rapport [29] som Statnett fikk utarbeidet er det lagt til grunn at sum DC resistans for transformator og jordingsanlegg i gjennomsnitt er på 0.61 Ohm. Dette er i samme størrelsesorden som de data som er oppgitt i Tabell 1.

Reaktivt forbruk i transformatorer under metning øker dessuten tilnærmet proporsjonalt med økende spenning på høyspenningssiden. Bidrag til GIC-relatert reaktiv effektlyt er derfor størst fra transformatorer for de høyeste systemspenninger. Innføring av høyere systemspenninger vil derfor gi høyere GIC-strømmer og høyre reaktivt forbruk ved metning i transformatorer. Samtidig øker kapasiteten i nettet ved høyere systemspenning slik at nettoeffekt ikke uten videre kan forutsees.

Tabell 1: Typiske verdier for DC-resistans i kraftnett i Nord-Amerika. DC-resistansen har avgjørende betydning på størrelsen av GIC-strømmer i kraftsystemet. Tabell er hentet fra [8].

System Voltage Levels (kV)	DC Resistances of the Transformers (ohm)	Grounding Resistances of the Substations (ohm)	DC Resistances of the Transmission lines (ohm/km)
230	0.692	0.563	0.072
345	0.356	0.667	0.037
500	0.195	0.125	0.013
735	0.159	0.258	0.011

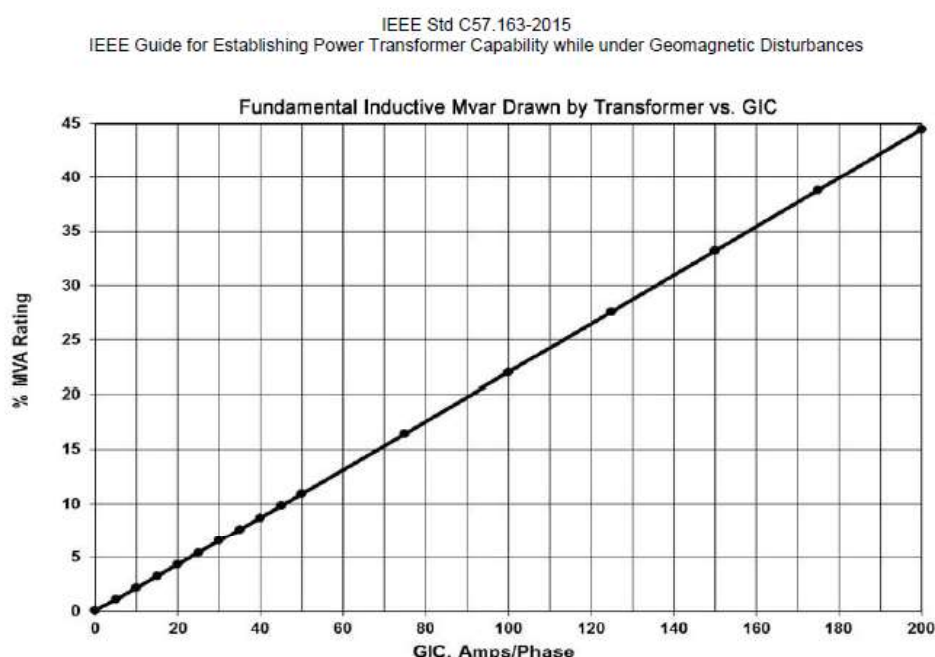
En innledende lastflytberegning vil typisk innebære:

- Bestemme dimensjonerende geoelektrisk felt (V/km) som skal legges til grunn i de forskjellige geografiske områder. Retningslinjer for Nord-Amerika finnes [9]. I studien [29] som Finnish Meteorological Institute gjorde for Statnett beregnet ut fra de begrensede magnetfeltmålinger som eksisterer, at de største feltstyrker i perioden 1994-2011 var rundt 5V/km. De estimerte videre at en hundreårsstorm trolig vil ligge under 10V/km.
- Simuler GIC-strømmer i nettet ved hjelp av dertil egnet verktøy med DC-modell av nettet. En del kommersielle program for kraftsystemberegninger har støtte for dette. EPRI har fritt tilgjengelig programvare [28].
- Estimer økt reaktivt effektbehov i alle transformatorer som følge av beregnede GIC-strømmer. Dette kan skje i samme verktøy eller gjøres separat. Dette er ikke enkelt siden det vil kreve data på transformatorene som normalt ikke er tilgjengelig. Her må en enten benytte typiske verdier eller innhente mer detaljer fra leverandører. Det mest realistiske er nok typiske verdier (se eksempler i Figur 15 og Figur 16).
- Kjør lastflyt der en tar hensyn til den økte reaktive effekten som trekkes av transformatorer. Her bør en se på dette i kombinasjon med mulig uønskede utkoblinger av kondensatorbatteri og SVC-er på grunn av overbelastning fra harmoniske.
- Hvis fluktuasjoner i spenning er under 3% er det sannsynligvis ikke nødvendig å gjøre mer detaljerte lastflytberegninger.

- Verifiser at den termiske tilleggsbelastning på transformatorer som følge av beregnede GIC-strømmer er innenfor hva som kan aksepteres (se IEEE guide [19] for detaljer om hvordan dette kan gjøres).

$K1$ (Mvar/A)*	Transformer core design
1.18	Single phase
0.33	Three-phase shell form
0.29	Three-phase, three-legged, core form
0.66	Three-phase, five-legged, core form

Figur 15: Eksempel på angitt typisk transformator reaktivt effektforbruk per ampere GIC-strøm i trafo (fra [12]).



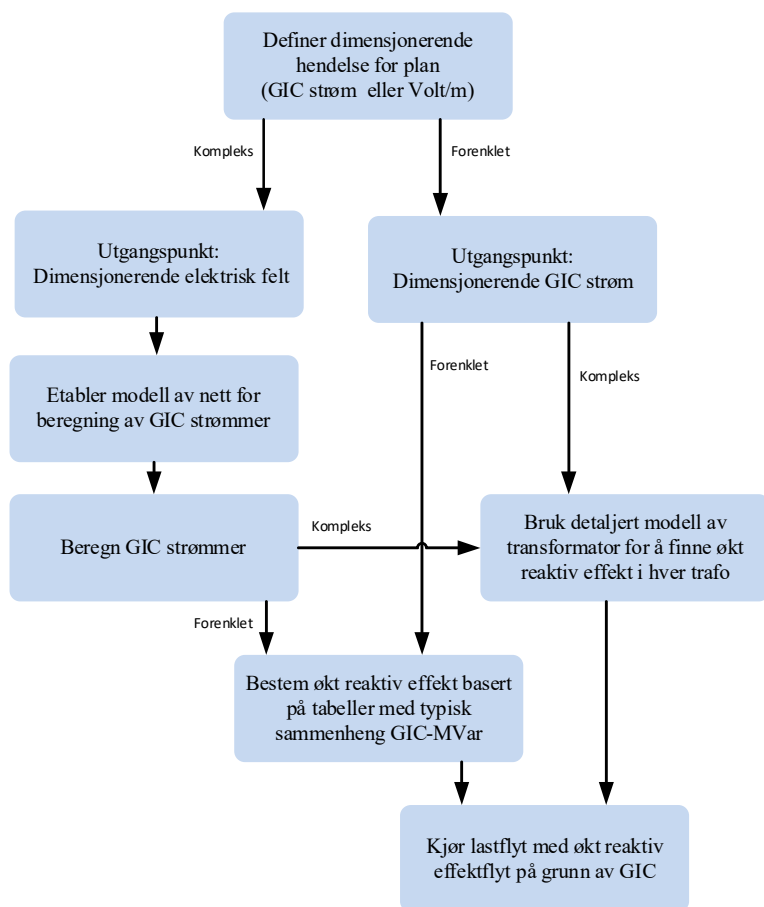
Figur 16: Eksempel på angitt typisk reaktivt effektforbruk for en transformator i prosent av merkeytelse avhengig av GIC-strøm (eksempel fra [19] for en 250 MVA en fase autotransformator).

Hvis de forenklede lastflytberegninger viser fluktasjoner over 3% i kombinasjon med normale uforutsette hendelser eller hvis estimert termisk tilleggsbelastning på transformatorer er høyere hva som kan tillates, må det gjennomføres mer detaljerte studier av påvirkning på system og komponenter.

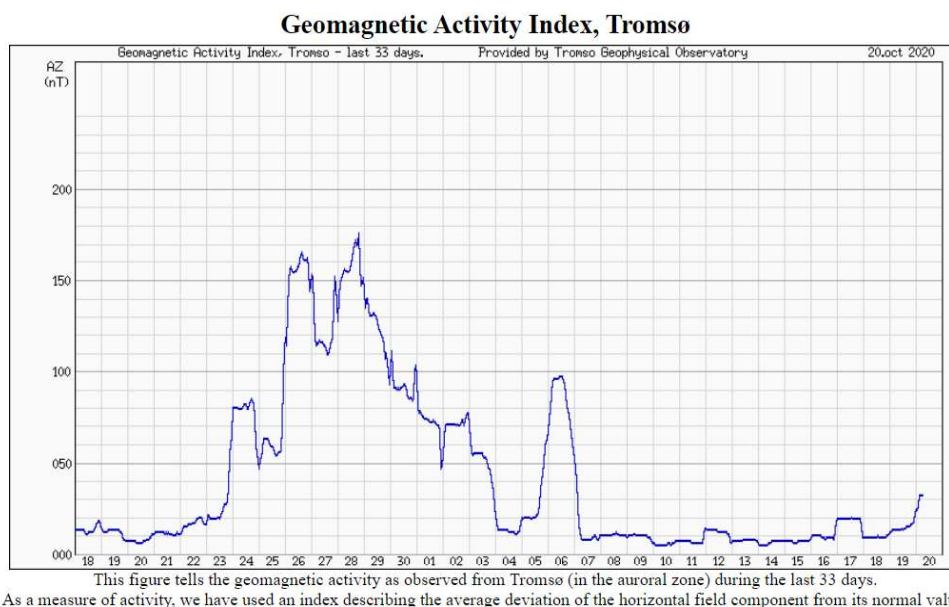
Merk her at den anbefalte grensen på 3% i [7] ikke må forvekslet med hva som man er villig til å akseptere av spenningsvariasjon i det aktuelle nett. Grensen er satt som anbefalt grense for når mer detaljerte studier anbefales.

Det kan her legges til at Statnett allerede har fått gjennomført analyser av det norske nettet for å få et bilde av hvor stor GIC-strøm som kan forventes på forskjellige punkter i nettet. Disse kan benyttes som grunnlag for å beregne effekten disse vil ha på lastflyt i nettet, og da spesielt hvordan reaktiv effekt vil påvirkes.





Figur 17: Alternative veier for gjennomføring av lastflyt i innledende undersøkelser.



Figur 18: Eksempel på data fra på tilgjengelige målinger av geomagnetisk aktivitet fra Universitetet i Tromsø. Her sees geomagnetisk indeks for 18. September til 20. Oktober 2020.

## 6.5 Vurdering av sårbarhet ovenfor GIC

Siden GIC-strømmer er et større problem langt mot nord så er det klart at kraftsystem i Skandinavia har en reell risiko for å bli påvirket av solstormer. Sårbarheten avhenger dog av hvilket utstyr man har i nettet, hvilken jordingsprinsipper man benytter, hvordan nettet driftes og ikke minst hvor godt forberedt man er i tilfelle en hendelse inntreffer.

Det er også mange faktorer, utover hvor langt nord man er, som påvirker styrken i de geomagnetiske felt. Det er derfor ikke gitt problemene er størst lengst mot nord.

## 6.6 Vurdering av transmisjonsnettets sårbarhet

For transmisjonsnettets vil en sårbarhetsvurdering typisk ha som mål å:

- Finne kraftsystemets marginer med hensyn på økt reaktivt effektforbruk i de transformatorer som kan bli påvirket av GIC. Det vil si å se på margin mot spenningsgrenser, spenningskollaps og kaskadeutkoblinger. Systemet må kunne operere stabilt også ved relevante eventualiteter så som utkoblede kondensatorbanker og SVC-er.
- Finne mulig farlig høy termisk påkjenning på utstyr som påvirkes av GIC-hendelser. Det vil i hovedsak si transformatorer som kan bli ødelagt av lokal oppvarming (hot-spots) som følge av fluks på avveier under metning. Tradisjonelle vern vil normalt ikke beskytte mot dette. Denne typen analyser er vanskelige og vil typisk kreve involvering fra leverandør. Dette vil nok derfor kun være aktuelt for transformatorer hvor risiko ansees spesielt høy, for eksempel på grunn av høy forventet GIC-strøm, høyt belastet transformator, transformator i dårlig tilstand eller at transformator er spesielt kritisk for nettdriften.
- Finne eventuelle svakheter i verninstillinger og vernstrategier som vil kunne gi unødig og uønsket utkobling på grunn av harmoniske fra transformatorer i metning og økt, atypisk, reaktiv effektflyt.
- Ekstra fokus på at SVC-transformatorer ikke går i metning, eller kobles unødig ut, slik at en mister bidrag til reaktiv balansering i nettet.

Det viktig å ta hensyn til variasjoner i hvordan nettet driftes og hvor hardt det belastes. En må for eksempel være spesielt oppmerksom på drift med få roterende generatorer tilkoblet siden en da sannsynligvis vil være mere sårbar. De reaktive reserver vil da typisk være mindre, samtidig som en mer avhengig av SVC og kondensatorbatterier for å holde stabiliteten. Systemet vil da være mere følsomt for utkoblinger av kondensatorbatterier. Siden lav korslutningsytelse gjerne henger sammen med høy import på utenlandskabler har en dessuten en økt risiko for en større forstyrrelser i form av utkobling av en høyt lastet utenlandskabel. I analysene må en derfor spesielt se på situasjoner med høy import via utenlandskabler i kombinasjon med lav innenlands produksjon.

## 6.7 Vurdering av produksjonens sårbarhet

For produksjonens vil en sårbarhetsvurdering typisk ha som mål å:

- Undersøke i hvilken grad generatorer er vernet mot de ikke-karakteristiske harmoniske som den typisk vil kunne utsettes for ved GIC-strømmer i nettet.
- Undersøke i hvilken grad det er sannsynlig at vern av transformator og generator vil kunne løse ut unødig som følge av de ikke-karakteristiske harmoniske som de vil utsettes for ved GIC-strømmer.

Det vil først og fremst være generatorer koblet opp mot transmisjonsnettets som vil være mest kritisk å kartlegge.

## 6.8 Analyse av komponentpåkjenninger under GIC

Beregning av komponentbelastning som følge av GIC er utfordrende. Transformatorer er mest utsatt som følge av tilleggstrøm når de går i metning og er dessuten en komponent som typisk vil være kostbar og tidkrevende å erstatte. Disse vil derfor være viktig å se på. For å estimere påkjenning av disse kan man:

- Bruke kurver fra leverandør som viser hvor mye DC-strøm som tillates (Finnes ikke for alle transformatorer).
- Bruke generisk/typiske kurver (Kun tilnærming).
- Simulere termisk respons (Svært krevende. Fordrer detaljert kjennskap til transformatorens oppbygging).

I vurderingen må en også ta hensyn til transformatorens tilstand (alder, gass og fuktighetsinnhold i oljen [7])

Andre komponenter som kan påvirkes er kondensatorbatteri, SVC og generatorer. Disse påvirkes av harmoniske. Simulering av harmoniske strømmer må derfor legges til grunn når en skal se på påkjenning av disse. Detaljert simulering av hvordan de harmoniske brer seg i nettet vil kreve detaljerte modeller av nettet. Her finnes mer og mindre nøyaktige metoder og modelleringsstrategier som krever mer og mindre detaljerte data for nett og komponenter. Dette er krevende beregninger og da spesielt krevende vil det være å fremskaffe tilstrekkelig detaljerte parametere for de modeller som må benyttes.

Hensikten med å se på utbredelse av harmoniske vil være å avklare:

- Hvorvidt komponentene er tilstrekkelig beskyttet mot den type harmoniske som transformator i metning genererer. Metning gir ikke de samme karakteristisk harmoniske som man ellers finner. Alle vern tar ikke nødvendigvis hensyn til alle harmoniske (uønsket siden det kan gi varig skade eller havari på komponenter).
- Hvorvidt det er vern vil være utsatt for å trippe unødige som følge av de harmoniske (sterkt uønsket siden det kan bidra til kaskadeutkoblinger).

Som det fremgår ovenfor så er dette ikke rett frem. Mere detaljer om komponentpåkjenninger kan en finne i NERC rapport [10] og i IEEE guide for transformatorer i [19].

## 6.9 Detaljert analyse av hvordan systemet påvirkes av GIC

En detaljert analyse av hvordan kraftsystemet påvirkes av GIC er svært krevende. Beregningene i seg selv er relativt enkle, utfordringen ligger i å skaffe tilveie inngangsdata for beregningene. Aktuelle beregninger er tidsplansimuleringer for å se på stabilitet i nettet når GIC inntreffer, samt harmoniske analyser for å se på utbredelse av harmoniske strømmer som følge av metning i transformatorer.

Det vises her til en NERC som har gitt ut en egen rapport som tar for seg hvordan en kan regne detaljert på GIC-strømmer i kraftsystemet [9].

## 6.10 Evaluer behov for systemforbedringer

Avhengig av utfallet av forangående analyser kan det være aktuelt å iverksette fysiske tiltak for å begrense GIC eller for å begrense konsekvenser av GIC. Dette vil da være tiltak som beskrevet i kapittel 4.2 og 4.3. Basert på evalueringen må det så utarbeides planer for de tiltak en finne nødvendig.

## 6.11 Hensynta GIC ved nyanskaffelser og revidering av vernstrategier

I forbindelse med nyanskaffelser kan en gjøre valg som kan være med på å redusere GIC og konsekvensene av GIC. Det er derfor naturlig å ta opp dette til vurdering ved nyanskaffelser. Det samme gjelder i forbindelse med revidering / modifikasjon av verninnstillinger og vernstrategier. Det som i hovedsak har betydning er:

### Transformator

- Valg av kjernetype (tre bein versus fem bein).
- Tåleevne for DC-magnetisering, og da spesielt GIC DC magnetisering<sup>1</sup>.
- Mengde reaktiv effekt ved GIC-strømmer.
- Kjøling
- Ekstra instrumentering (temperatur, måling av DC-strøm i nullpunkt).

### Kondensatorbatteri

- Vernstrategi og innstilling.
- Overdimensjoner kondensatorbatteriene slik at de tåler en høyere rms-strøm og dermed slik at de uten risiko kan forbli innkoblet selv ved høye harmoniske strømmer forårsaket av GIC (kan for eksempel gjøres ved å sette inn ett batteri beregnet på litt høyere systemspenning, og med litt høyre merkeytelse).

### FACTS, inkludert SVC

- Vernstrategi og -innstilling.
- Kraftelektronikkomformeres følsomhet for spenningsvariasjon og harmoniske.

### Produksjonsenheter

- For transformator mot transmisjonsnett gjelder det som er angitt ovenfor.
- Vernstrategi og -innstilling.
- Generators termiske tåleevne for harmoniske.
- Kraftelektronikkomformeres følsomhet for spenningsvariasjon og harmoniske (vindkraftverk).

## 6.12 Sanntidsovervåking av sårbarhet

Et viktig element å vurdere er hva som må til for at systemer eller operatører fanger opp at en GIC-hendelse pågår. Dette kan gjøres ved overvåking av harmoniske, atypisk reaktiv effektlyt og spenningsvariasjoner, romværsvarslinger og GIC-målinger. Viktigheten av å legge til rette for tidlig oppdagelse avhenger av hva man har konkludert med i sårbarhetsanalysene. Atypisk reaktiv effektlyt er kanskje noe av det enkleste å etablere. Normal reaktiv effekt i transformatorer ved forskjellige belastninger og spenningsnivå vil være enkelt å estimere. Eventuelle avvik trigget av GIC kan dermed identifiseres.

---

<sup>1</sup> I henhold til informasjon fra NVE har Statnett ved innkjøp av nye transformatorer lagt seg på samme linje som SvK (Svenska Kraftnät) på spesifikasjoner, det vil si at disse skal tåle 100 A likestrøm i et kortere tidsrom (minutter).

Statnett har sannsynligvis, eller vil i nær fremtid ha, en digital tvilling av transmisjons- og regionalnett. I en slik tvilling kan en implementere en modul som kontinuerlig overvåker og kvantifiserer hvor sårbart nettet er i øyeblikket ovenfor en GIC-hendelse. Dette vil kreve noe annen input en det en ellers trenger for lastflytberegninger, men bør være gjennomførbart. Dette kan i tillegg kobles opp mot varslingstjenester for solstormer og geomagnetisk induisert spenning (her finnes det tjenesteleverandører, men i dette arbeidet er det ikke undersøkt om disse leverer tjenester på egnet form for Skandinavia) Dermed vil en til enhver tid ha et godt grunnlag for å ta hensyn til GIC i operasjon samt for i tide å få beskjed når en må være ekstra på vakt og kanskje må sette i verk operasjonelle tiltak for å begrense risiko.

En implementasjon i en digital tvilling vil også kunne fange opp og varsle eventuell mistenkelig samtidighet mellom varslede, eller enda bedre, målte GIC-strømmer, og hendelser i nettet (atypisk reaktiv effektflyt, utkoblinger, harmoniske, kommunikasjonsproblemer).

### **6.13 Definere triggerer for aksjon og tilhørende operasjonelle prosedyrer**

På et tidspunkt må man ta stilling til hva som skal trigge aksjoner fra operatører. Avhengig av hvilken sanntidsovervåkning man har iverksatt må det etableres korresponderende triggerer for når operasjonelle tiltak skal settes inn.

Det må deretter etableres prosedyrer som beskriver hvilke tiltak som skal iverksettes avhengig av hvilke triggerer som er utløst. Dette vil da typisk være et eller flere av tiltakene beskrevet i kapittel 4.4.

### **6.14 Oppfølging**

Det er naturlig nok viktig at planer følges opp og at en følger opp med analyser som inkluderer foreslåtte og gjennomførte tiltak og at disse revideres når vesentlige endringer gjøres.

## 7 KONKLUSJONER OG ANBEFALINGER

Denne rapporten ble utarbeidet på bestilling fra NVE med målsetning om å beskrive tiltak for å håndtere risiko og motvirke konsekvenser relatert til geomagnetisk induserte strømmer i kraftledninger.

Det kommer frem av rapporten at geomagnetisk induserte strømmer representerer en risiko som en må ta høyde for i planlegging og drift av transmisjonsnett med systemspenninger over 200 kV. I tillegg må også eiere av kraftverk koblet rett opp mot transmisjonsnettet forholde seg til den risikoen geomagnetisk induserte strømmer representerer.

Det er utenfor rammene for denne rapporten å definere eksakt hvilke tiltak som systemoperatør og kraftverkseiere som minimum må iverksette. Hvor omfattende tiltak som trengs, i form av analyser, investeringer eller operasjonelle prosedyrer, avhenger helt av hva innledende analyser viser, samt hvilken risiko en velger å akseptere. Her vil en som alltid også måtte veie dette opp mot kostnadene. Dette må systemeiere selv vurdere og avklare i samråd med NVE.

Anbefalingen fra SINTEF vil være at en følger de stegene som er beskrevet i kapittel 6 inntil man mener at den resterende risiko er akseptabel. Mest sannsynlig vil det ikke være behov for å ta i bruk de mest arbeidskrevende og kostbare analyser og tiltak som er beskrevet i kapittel 6, men dette kan en ikke uten videre konkludere med på forhånd. En siste anbefaling må være at en bør ha meget gode grunner for å iverksette eller kreve utført de mest detaljerte analyser, så som detaljerte beregninger av forventede tap i transformatorer eller detaljert beregning av harmoniske strømmer.

## REFERANSER

- [1] "Research Findings for Geomagnetic Disturbance Research Work Plan", Summary Report August 2020, Electric Power Research Institute, EPRI.
- [2] "Geo-Magnetic Disturbances (GMD): Monitoring, Mitigation, and Next steps". A literature Review and Summary of the April 2011 NECRC GMD Workshop, NECR (2011).
- [3] "Application guide. Computing Geomagnetically-Induced Current in the Bulk-Power system" NERC (2013a).
- [4] "Geomagnetic Disturbance Planning Guide", NERC (2013b).
- [5] "Risk and mitigation of geomagnetically induced currents in the power system", SINTEF Project Memo AN 16.14.29.
- [6] "Geomagnetically induced currents in the swiss transmission network", A Technical Study commissioned by the Swiss Federal Office of Energy and swissgrid, FEN Research Centre for Energy Networks - ETH Zurich.
- [7] "Geomagnetic Disturbance Planning Guide", North American Electric Reliability Corporation (NERC), December 2013.
- [8] "Network Applicability Project 2013-03 (Geomagnetic Disturbance Mitigation)" NERC EOP-010-1 (Geomagnetic Disturbance Operations).
- [9] "Application Guide: Computing Geomagnetically-Induced Current in the Bulk-Power System", NERC Desember 2013.
- [10] "Effects og Geomagnetic Disturbances on the Bulk Power System", 2012 Special Reliability Assessment Interim Report, NERC.
- [11] "Modelling geomagnetically induced currents", Boteler, D. H., and R. J. Pirjola (2017), Space Weather, 15, 258–276, doi:10.1002/2016SW001499.
- [12] "Industry Advisory Preparing for Geo-Magnetic Disturbances", NERC May 2011.
- [13] "Geomagnetic Disturbance Operating Procedure Template, Generator Operator", NERC.
- [14] " Geomagnetic Disturbance Operating Procedure Template Transmission Operator", NERC.
- [15] "Transmission System Planned Performance for Geomagnetic Disturbance", Standard TPL-007-4, NERC, 2020.
- [16] "Effects of GIC on power transformers and power systems," R. Girgis and K. Vedante, PES T&D 2012, Orlando, FL, 2012, pp. 1-8, doi: 10.1109/TDC.2012.6281595.
- [17] "Geomagnetic Disturbances (GMD) Impacts on Protection Systems" Report PES-TR72 September 2019. IEEE PES Power System Relaying and Control Committee K, Substation Protection Subcommittee Working Group K17
- [18] "Generator thermal stress during a Geomagnetic Disturbance," A. Rezaei-Zare and L. Marti, 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Vancouver, BC, 2013, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESMG.2013.6672072.
- [19] "IEEE Guide for Establishing Power Transformer Capability while under Geomagnetic Disturbances," IEEE Std C57.163-2015 , vol., no., pp.1-50, 26 Oct. 2015, doi: 10.1109/IEEESTD.2015.7286929.

- [20] J. Raith and U. Schichler, "Risk assessment of electrical equipment under the influence of GIC," 2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Xi'an, 2016, pp. 341-344, doi: 10.1109/CMD.2016.7757824.
- [21] I. Babaeiyazdi, M. Rezaei-Zare and A. Rezaei-Zare, "Wind Farm Operating Conditions Under Geomagnetic Disturbance," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 35, no. 3, pp. 1357-1364, June 2020, doi: 10.1109/TPWRD.2019.2940913.
- [22] "Mitigation of Geomagnetically Induced Currents by Neutral Switching", Baris Kovan and Francisco de León, IEEE transactions on power delivery, vol. 30, no. 4, august 2015 pp. 1999-2006.
- [23] GIC measurement equipment example: <https://www.dynamicratings.com/geomagnetic-induced-current-sensor/>
- [24] GIC measurement equipment example: <https://advpowertech.com/products/>
- [25] Tromsø Geophysical Observatory <https://flux.phys.uit.no/geomag.html>,
- [26] Piccinelli R, Krausmann E. "North Europe power transmission system vulnerability during extreme space weather", 2018. J. Space Weather Space Clim. 8: A03.
- [27] British Geological Survey, <http://www.geomag.bgs.ac.uk>
- [28] EPRI Electric Power Research Institute, OpenDSS electric power distribution system simulator. <https://www.epri.com/pages/sa/opensdss>
- [29] "Geomagnetically induced currents in the Norwegian high-voltage power grid: Statistics and extreme case estimations, Final report", Minna Mylly and Ari Viljanen, Finnish Meteorological Institute, 25 June 2013 (rapport utarbeidet for Statnett).
- [30] Risto Pirjola , "Practical Model Applicable to Investigating the Coast Effect on the Geoelectric Field in Connection with Studies of Geomagnetically Induced Currents", Advances in Applied Physics, Vol. 1, 2013, no. 1, 9 – 28, HIKARI Ltd, www.m-hikari.com
- [31] <https://www.powerworld.com/files/06Emprimus.pdf>
- [32] "Understanding of geomagnetic storm environment for high voltage power grids", Reference TB 780, Cigre, October 2019.
- [33] Space weather prediction center, <https://www.swpc.noaa.gov/>





Teknologi for et bedre samfunn

[www.sintef.no](http://www.sintef.no)