

KAN SÅRBARHETER I KRAFTNETTET OVERVÅKES? ER DET MULIG Å FINNE GODE INDIKATORER FOR DETTE?

*Gerd Kjølle, Oddbjørn Gjerde, Matthias Hofmann, SINTEF Energi
Birger Hestnes, NEK/DSB, Johan G. Hernes, NTE Nett*

Sammendrag:

I dag finnes få indikatorer og begrenset informasjon på nasjonalt nivå som kan brukes til å dokumentere sårbarhet i kraftsystemet.

Feilfrekvens, ikke levert energi og KILE-kostnader er eksempler på indikatorer vi bruker i dag, og som dekker ulike deler av sårbarhetsbildet. For å beskrive et helhetlig bilde av sårbarhet trengs det informasjon om hvor følsomt systemet er overfor gitte trusler og hvilken evne systemet har til å opprettholde eller gjenoppta sin funksjon. Videre trengs informasjon om trusselbildet og potensielle konsekvenser for kraftsystem og samfunnet. Rapporten beskriver viktige aspekter av sårbarhet, og det er vist at det er behov for flere ulike indikatorer for å si noe om utviklingen i sårbarhet i et system som endres over tid og står overfor en rekke nye utfordringer.

1. MOTIVASJON OG BAKGRUNN

Samfunnet er kritisk avhengig av stabil kraftforsyning, og sårbarheten overfor avbrudd er økende. Men har kraftforsyningen blitt mer sårbar de senere år? Kraftsystemet kjennetegnes av at det er en aldrende infrastruktur som driftes hardere enn før og står overfor økende klimapåkjenninger. Samtidig stilles det nye krav til kraftsystemet som følge av målsettinger om mer fornybar kraftproduksjon og integrasjon av uregulert distribuert produksjon, elektrifisering av transport osv.

[1, 2]. SmartGrids (en merkelapp på fremtidens energisystem) fremheves som løsningen på mange av disse utfordringene. På den annen side vil overgangen til smartere nett (SmartGrids) med avanserte måle- og styresystemer og kommunikasjonsløsninger osv. innebære økende IKT-avhengigheter i kraftsystemet, større grad av kompleksitet og nye utfordringer knyttet til personsikkerhet.

I dag finnes få indikatorer og begrenset informasjon på nasjonalt nivå til å dokumentere sårbarhet. Feil- og avbruddsstatistikk er så langt det beste datagrunnlaget vi har til å si noe om utviklingen i forsyningssikkerhet (leveringspålitelighet) [3]. Disse dataene inneholder imidlertid kun informasjon om hendelser som har skjedd

og de komponentene som har hatt feil. Det er behov for kunnskap om utviklingen i sårbarhet.

I forskningsprosjektet “Vulnerability and security in a changing power system”¹ er det en målsetting å beskrive indikatorer som kan brukes til å overvåke og kontrollere sårbarheter i kraftnettet, f.eks. relatert til aldring, utnyttelsesgrad, grad av reservesystemer, ekstremvær osv. Til hjelp i dette arbeidet er det etablert et rammeverk for å analysere sårbarheter, og en rekke større blackouts er analysert, deriblant avbruddet i Steigen i 2007, hvor en liten kommune mistet forsyningen i seks døgn, og brann i kabelkulptert på Oslo S, som ga store ringvirkninger for transport og telekommunikasjon [4].

Rapporten beskriver rammeverket for å analysere og identifisere sårbarheter, ulike typer indikatorer og hvordan vi kan gå fram for å måle sårbarhet. Det gis eksempler på barrierer mot uønskede hendelser og indikatorer, inkludert et konkret case.

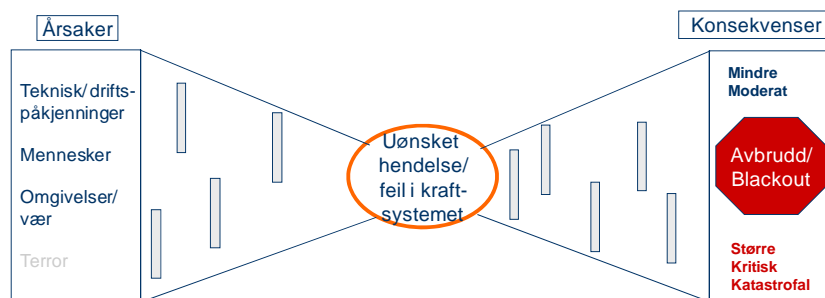
2. RAMMEVERK FOR Å ANALYSERE SÅRBARHET

Sårbarhet defineres på ulike måter i litteraturen, f.eks. *”Sårbarhet er et uttrykk for de problemer et system vil få med å fungere når det utsettes for en uønsket hendelse, samt de problemer systemet får med å gjenoppta sin virksomhet etter at hendelsen har inntruffet.”* [5]. En annen definisjon av sårbarhet er: *”et karakteristisk trekk ved et element i den kritiske infrastrukturens design, bygging eller drift som ved en feil eller trussel gjør den mottakelig for ødeleggelse eller ute av stand til å utføre sin funksjon”* [6]. Sårbarhet er en intern egenskap til selve systemet, knyttet til trusler og påkjenninger som kraftnettet eksponeres for og til konsekvensene dette kan medføre for samfunnet.

En modell som er mye benyttet for å illustrere årsaks- og konsekvenssammenhenger for uønskede hendelser, er den såkalte *”Bow-tie modellen.”* Figur 1 viser en slik modell der den uønskede hendelsen er feil i kraftsystemet, med ulike feilårsaker til venstre i figuren og mulige konsekvenser til høyre.

Sårbarhet er primært knyttet til hendelser med (potensial for) større, kritiske eller katastrofale konsekvenser. Disse kan både forårsakes av normale (hyppige) feil og av ekstraordinære (sjeldne) feil.

¹ RENERGI-programmet til Forskningsrådet, utføres i perioden 2009 – 2012, <http://www.sintef.no/Projectweb/Vulnerability-and-security/>



Figur 1 Bow-tie modell, feil i kraftsystemet

Figuren indikerer at det finnes et antall barrierer som kan hindre at en trussel eller påkjenning kan utvikle seg til en uønsket hendelse og som kan motvirke eller redusere konsekvensene. Barrierene kan grupperes i ulike typer avhengig av hvilken funksjon de har [7]. Eksempler på barrierer mot trusler og konsekvenser er gitt i tabell 1:

Tabell 1 Eksempler på barrierer

Barrierer mot trusler/påkjenninger	Barrierer mot konsekvenser
Dimensjoneringskriterier (eks N-1)	Systemvern
Vedlikehold og reinvesteringer	Personell
Skogrydding	Transport og samband
Testing av verninnstillinger osv.	Reservemateriell osv.

Et system er sårbart overfor en gitt trussel eller påkjenning dersom

- Det er et potensial for alvorlige konsekvenser, og
- Eksisterende barrierer er utilstrekkelige eller har svakheter, eventuelt at de ikke fungerer som forutsatt.

For å beskrive sårbarhet, er det derfor behov for indikatorer som kan si noe om både tilstedeværelsen av trusler/påkjenninger, utviklingen i trusselbildet og potensielle konsekvenser, samt om hvilke barrierer som finnes, om de er tilstrekkelige og hvordan de utvikler seg.

Bow-tie-modellen som beskriver sammenhengen mellom årsaker til og konsekvenser av uønskede hendelser er brukt til å analysere og strukturere noen større avbruddshendelser som er godt beskrevet i litteraturen [4]. Disse analysene gir f.eks. informasjon om sårbarheter og hvilke type barrierer som kunne ha bidratt til å forhindre hendelsene. Eksempler er vist for to ulike hendelser i det norske kraftsystemet i tabell 2.

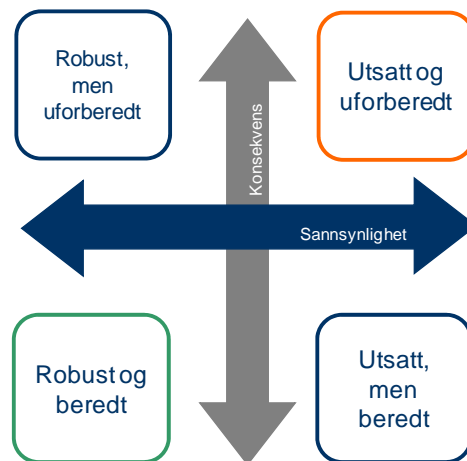
Tabell 2 Eksempler på hva vi kan lære fra tidligere hendelser [4]

Uønsket hendelse	”Vestlandsfeilen”, februar 2004 <i>Brudd i lineskjøt</i>	Steigen, januar 2007 <i>Havari av kraftledninger</i>
Årsak	Konstruksjonsfeil Degradering av komponenter ”Uheldig” vernløsning	Kraftig vind, ising Konstruksjonsfeil Degradering (aldring)
Barrierer	Bedre instruksjoner Tilstandsovervåking Bedre vernløsning	Bedre trasévalg/ design Tilstandsovervåking Bedre avvikshåndtering

Med utgangspunkt i tankesettet illustrert i bow-tie modellen (figur 1), kan samfunnets sårbarhet knyttet til hendelser i kraftsystemet beskrives i to dimensjoner:

1. Sannsynlighet for uønskede hendelser i kraftsystemet
 - Robust vs utsatt
2. Evne til å håndtere uønskede hendelser i kraftsystemet
 - Beredt vs uforberedt

Kombinasjoner av disse dimensjonene er illustrert i figur 2.



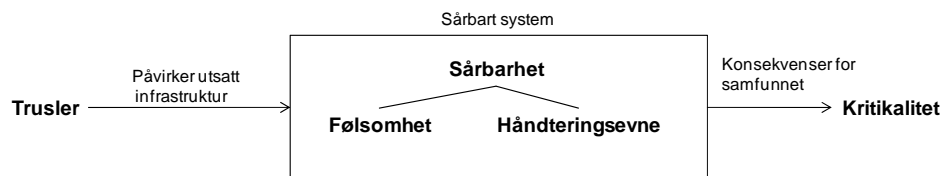
Figur 2 Dimensjoner for kraftsystemet og sårbarhet mot 2030 [1]

”Utsatt og uforberedt” innebærer en høy grad av sårbarhet, mens ”Robust og beredt” innebærer en lav grad av sårbarhet. Basert på dimensjonene i figur 2, er det i prosjektet beskrevet noen enkle scenarioer for utviklingen av kraftsystemet og sårbarheter fram mot 2030 [1]. Disse enkle scenarioene er et hjelpemiddel til å identifisere

hvilken informasjon som er nødvendig å måle eller framskaffe for å si noe om utviklingen i sårbarheter for et kraftsystem i endring.

3. HVORDAN KAN VI MÅLE SÅRBARHET?

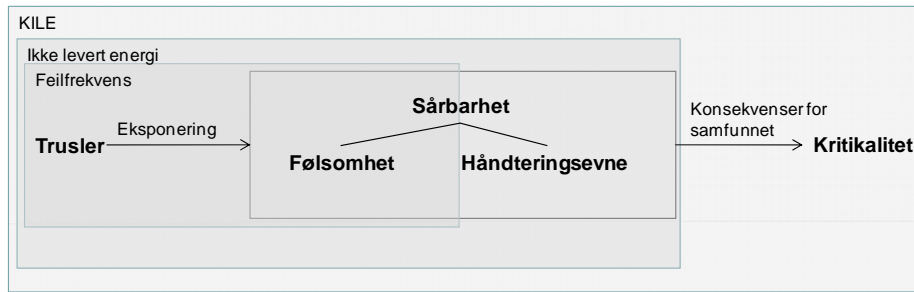
Sårbarhet er en intern egenskap av selve systemet (robusthet er motstykket til sårbarhet). Som beskrevet foran refererer sårbarhet til et gitt system sin evne til å fungere og oppnå sine mål når det utsettes for trusler og inkluderer også problemer systemet får med å gjenoppta sin funksjon. Det trengs derfor informasjon om hvor følsomt systemet er overfor gitte trusler og hvilken evne systemet har til å opprettholde eller gjenoppta sin funksjon (håndteringsevne). Vi fokuserer her på trusler og sårbarheter som kan føre til alvorlige konsekvenser for kraftsystem og samfunnet. For å beskrive et komplett bilde av sårbarhet trengs det også informasjon om trusselbildet og potensielle konsekvenser. Dette er illustrert i figuren nedenfor.



Figur 3 Sårbarhetsbildet

Et eksempel på en trussel som påvirker kraftsystemet er storm. Hvor følsomt systemet er overfor stormen avhenger imidlertid av om systemet er dimensjonert for å tåle stormen. Dersom systemets tilstand er svekket pga degraderte komponenter vil det gjøre systemet mer følsomt overfor eksterne trusler. Teknisk tilstand vil derfor først og fremst være en intern egenskap til systemet. På den annen side vil degraderingen (svekket tilstand) også kunne være årsak til feil som fører til avbrudd og på den måten indirekte representere en trussel.

Som nevnt tidligere er det behov for indikatorer for å beskrive sårbarhet, og figur 4 gir eksempler på noen som benyttes i dag og hvilke deler av sårbarhetsbildet de beskriver. Feilfrekvens beskriver resultatet av de trusler systemet har vært eksponert for og følsomheten overfor truslene. Ikke levert energi sier i tillegg noe om håndteringsevnen, dvs. resultatet av hendelsen målt i omfang av utkoplet last og varighet. KILE tar videre med seg den samfunnsmessige konsekvensen for ulike typer sluttbrukere målt i avbruddskostnader.



Figur 4 Eksempler på indikatorer som beskriver deler av sårbarhetsbildet

I litteraturen beskrives to forskjellige typer indikatorer som er relevante for å måle sårbarhet [8]:

1. Leading og lagging
2. Activity og outcome.

Den første typen indikatorer er egnet til å beskrive sårbarheten til systemet. En *lagging* indikator sier noe om hvordan sårbarheten til et system *har vært eller er*, mens en *leading* indikator sier noe om hvordan sårbarheten til et system *vil utvikle seg i framtida*.

Den andre typen indikatorer beskriver aktiviteter for å redusere sårbarhet, der *activity* indikatorer gir informasjon om *aktivitetsnivået* (målrettede aktiviteter), mens *outcome* indikatorer sier noe om en målrettet aktivitet *har ført* til en reduksjon i sårbarhet. I praksis er disse indikatortypene tett sammenknyttet. Se eksempler i tabell 3.

Tabell 3 Eksempler på ulike typer indikatorer

Lagging	Leading	Activity	Outcome
Teknisk tilstand av komponenter	Utvikling av teknisk tilstand basert på en aldringsmodell	Antall km linje med forbedret skogrydding	Antall feil relatert til vegetasjon i forhold til antall feil før skogryddingen ble forbedret

De nevnte indikatorene feilfrekvens, ikke levert energi og KILE er alle *lagging* indikatorer slik de framkommer i avbruddsstatistikken. Disse tre indikatorene henger sammen og er kanskje det beste datagrunnlaget vi har pr i dag som sier noe om dagens forsyningsikkerhet og sårbarhet. På nasjonalt nivå overvåker vi i tillegg en del andre forhold:

- Kraftbalansen (energi, effekt)
- Målinger av spenningskvalitet
- Feil- og avbruddsstatistikk
- KILE-kostnader
- Aldersutvikling på komponentene
- Investeringer
- Vedlikehold og reinvesteringer
- Overholdelse av forskriftskrav
- Statistikk over ulykker med elektrisitet, med personskaade.

Disse faktorene er i hovedsak av typen *lagging* og *outcome*, dvs. de beskriver status og utviklingen fram til i dag. Noen av dem er også av typen *activity*, som f.eks. investeringer, vedlikehold og reinvesteringer, samt risiko- og sårbarhetsanalyser. I tillegg trekkes lærdom av tidligere (ekstraordinære) hendelser, og det gjennomføres risiko- og sårbarhetsanalyser (pålagt fra 2003).

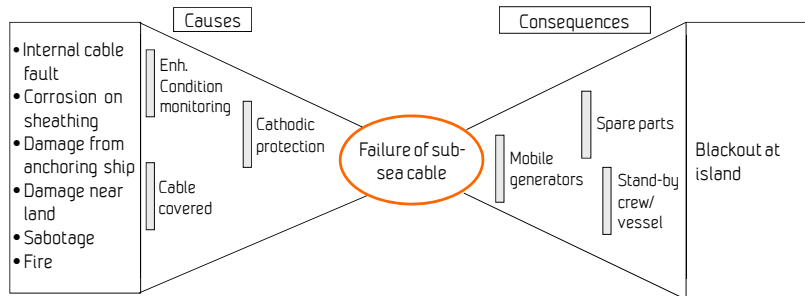
For å dekke hele sårbarhetsbildet beskrevet i figur 3 og for ulike formål knyttet til regulering, planlegging og drift trengs informasjon om ulike sårbarhetsaspekter. Sårbarhetsindikatorer som skal være egnet til å si noe om utviklingen framover, må være av typen *leading* og da trengs i tillegg en modell for å beskrive forventet utvikling i indikatoren.

En rekke viktige aspekter av sårbarhet knyttet til tekniske-, menneskerelaterte- og organisatoriske forhold er identifisert i samarbeid med brukerbedriftene i prosjektet. Noen av de mest sentrale dreier seg om kompetanse og rekruttering, belastningsgrad, tilstandsutvikling, informasjon om ytre påkjenninger (værrelatert), standardisering, koordinering og harmonisering av regelverk, kvalitet på risiko- og sårbarhetsanalyser, planer og prosedyrer, samt ansvarsavklaringer. Samfunnets forståelse av og kriterier knyttet til forsyningssikkerhet er også trukket fram. Et tema som særlig er i fokus i kraftbransjen er usikkerheten knyttet til framtidig tilgang på tilfredsstillende kompetanse og faglig kapasitet.

4. CASE OG EKSEMPLER PÅ INDIKATORER

Før vi kan begynne å etablere indikatorer for å måle sårbarhet trenger vi å analysere og identifisere sårbarheter og mulige barrierer mot uønskede hendelser. Analyser av tidligere hendelser (se f.eks. tabell 2 og [4]) og konkrete case kan gi et verdifullt underlag for dette. Som et

eksempel benyttes her strømforsyningen til øya Leka i Nord-Trøndelag. Leka har ensidig forsyning fra en 66/22 kV transformator på fastlandet, via en 22 kV kraftledning og sjøkabel. Basert på en risiko- og sårbarhetsanalyse er det identifisert noen uønskede hendelser som kan føre til at Leka mister strømforsyningen (blackout). I det følgende ser vi nærmere på utfall av sjøkabelen som eksempel på uønsket hendelse. Figur 5 viser bow-tie modellen for denne hendelsen med trusler/årsaker, barrierer og konsekvens (blackout).



Figur 5 Bow-tie for uønsket hendelse ”utfall av sjøkabel”, Leka [8]

Som figuren viser er det identifisert noen barrierer mot denne hendelsen:

Barrierer mot trusler/påkjenninger:

- Kabelen er tildekket ved ilandføringen i begge ender
- Økt tilstandsovervåkning er implementert
- Katodisk beskyttelse er etablert for å unngå korrosjon.

Barrierer mot konsekvenser:

- Mobile reserveaggregater som kan dekke opp til 100 % av lasten er tilgjengelig innenfor spesifiserte tidsrammer
- Utvalgte reservedeler for å reparere sjøkabel finnes på lager
- Personell for reparasjon er tilgjengelig innenfor spesifisert tid.

Det er identifisert noen sårbarhetsaspekter som er viktige for denne uønskede hendelsen. Basert på disse er det laget noen eksempler på mulige indikatorer av typene *lagging* og *leading*, gitt i tabell 4.

Tabell 4 Eksempler på indikatorer knyttet til utfall av sjøkabel

Indikator	Beskrivelse	Hvilke deler av sårbarhetsbildet dekkes			Indikator type	
		Trussel/ påkjenning	Årsak (følsomhet)	Konsekvens (gjenopprett- ingsevne)	Lagging	Leading
Teknisk tilstand	Teknisk tilstand av sjøkabel basert på et tilstandsovervåkingsprogram				X	
Prognose for teknisk tilstand	Estimert utvikling i teknisk tilstand basert på en prognosemodell					X
Feilfrekvens	Feilhistorikk for sjøkabelen				X	
Visuelt inntrykk	Visuell inspeksjon av feil og om tildekning nær land er ok				X	
Beredskapsstyrke	Kvalifisert personell tilgjengelig i egen bedrift eller via kontrakter med leverandører				X	
Reparasjonsfartøy for sjøkabel	Beredskapskontrakt tegnet for reparasjonsfartøy for sjøkabel, med angitt tid for reparasjon				X	
Reservemateriell	Reservemateriell for sjøkabel på lager				X	
Mobile reserveaggregat	Mobile reserveaggregat tilgjengelig, egne eller via kontrakter, med angitt kapasitet og tid for tilkopling				X	
ROS-analyse utført					X	
Været	Normalt eller dårlig vær				X	
Værprognose	Normalt eller dårlig (ekstrem-) vær					X
Klimaprognose	Utviklingen i fukt/nedbør, vind, temperatur i årene framover					X

Vi ser av tabellen at de fleste av disse potensielle indikatorene er av typen *lagging*, dvs. de er egnet til å si noe om hva sårbarheten er nå og utviklingen fram til i dag. Eksempler på *leading* indikatorer er prognose for utviklingen framover i teknisk tilstand på sjøkabelen samt vær- og klimaprognoser. En værprognose vil være viktig også for denne uønskede hendelsen fordi været er av stor betydning for tilgang til reparasjonsfartøy og annen transport for å kunne gjennomføre reparasjon av sjøkabelen.

5. KONKLUSJON OG VIDERE ARBEID

Det er behov for indikatorer som er egnet til å måle og overvåke sårbarhet i kraftsystemet og til å si noe om utviklingen i denne i et system som står overfor en rekke nye utfordringer og endres over tid.

I denne rapporten er det vist at det er trengs flere ulike indikatorer for å beskrive et komplett bilde av sårbarhet, nemlig indikatorer som kan beskrive utviklingen i trusselbildet, systemets følsomhet overfor trusler og påkjenninger, håndteringsevne og konsekvenser for kraftsystem og samfunnet. Det er i tillegg nødvendig å kombinere forskjellige typer indikatorer av både *lagging* og *leading*, *activity* og *outcome* type, for ulike formål i planlegging og drift av kraftsystemet.

Noen viktige aspekter av sårbarhet er identifisert knyttet til mennesker, teknologi og organisasjon. Det videre arbeidet vil konsentrere seg om å lage forslag til noen indikatorer som beskriver sårbarhet overfor gitte typer trusler, som dekker ulike aspekter av sårbarhet og for ulike formål. For å prioritere hvilke indikatorer prosjektet skal gå videre med er det nødvendig å finne kriterier for hva som kjennetegner en god indikator. I neste trinn er det en målsetting å etablere målestokker og skalaer for indikatorene, beskrive hvordan de skal beregnes og hvilke data de skal være basert på. Og sist, men ikke minst er det viktig å kunne beskrive hvordan ulike indikatorer skal kombineres/aggregeres for å beskrive sårbarhetsbildet.

6. REFERANSER

[1] Nybø, A., Gjerde, O., "Scenarier for utviklingen av kraftsystemet og sårbarhet fram mot 2030", SINTEF Energi, juni 2010, AN. 10.12.64

[2] Energi21 – Rapport fra innsatsgruppe Energisystemer, www.energi21.no

[3] Kjølle, G., Samdal, K., Mogstad, O., "Hva kan feil- og avbruddsstatistikk si om utviklingen i leveringspålitelighet?", NEF Teknisk Møte, Trondheim, 2007

[4] Nybø, A., Kjølle, G., "Analysis of blackouts and extraordinary events in the power system", SINTEF Energi, mars 2010, AN 09.12.46

[5] NOU 2000:24 "Et sårbart samfunn"

[6] EU Com., "On a European Programme for Critical Infrastructure Protection", Green Paper (COM (2005) 576)

[7] Kjølle, G., Gjerde, O., Nybø, A., "A framework for handling high impact low probability (HILP) events", CIRED Workshop, Lyon, juni 2010

[8] Gjerde, O., Kjølle, G., Hernes, J. G., Hestnes, B., Foosnæs, J. A., "Indicators to monitor and manage electricity distribution system vulnerability, artikkel akseptert for presentasjon på CIRED, Frankfurt, juni 2011