

DETEKTERING AV ØYDRIFT

Forfatter: Hans Kristian Muggerud, Student ved NTNU - Energi og miljø.

Sammendrag

Utbyggingen av småkraft har ført til økende grad av distribuert produksjon. Dette skaper nye utfordringer, blant annet uønsket øydrift som oppstår hvis en del av kraftsystemet som har tilkoblet en eller flere distribuerte enheter, blir frakoblet hovednettet.

Per dags dato ønskes det at all øydrift blir koblet bort så fort som mulig. Småkraftverk har ofte en forenklet regulatorutrustning og vil av denne grunn ikke kunne holde spenning og frekvens innenfor akseptable grenser.

Utfordringen er å finne en vernutrustning som oppdager at øydrift har oppstått. Det finnes i dag flere ulike løsninger på markedet, og spesielt populært er vektorskiiftvernet. Rapporten omhandler i hovedsak dette vernet og fokus er på situasjoner der øydrift er vanskeligst å detektere.

1 ULIKE LØSNINGER

For detektering av øydrift finnes det flere metoder. Disse kan deles i to generelle kategorier; passive og aktive metoder [1] - [5]. De passive metodene er enklest å installere og baserer seg på konvensjonelt måleutstyr. De aktive metodene blir ikke behandlet i denne rapporten.

1.1 Konvensjonelt over-/underspenningsvern

Vernet baserer seg på ubalanse i reaktiv effekt i systemet. Ved øydrift vil det mest sannsynlig bli endring i den reaktive effektbalansen, og det oppstår spenningsvariasjoner. Gitte grenseverdier på overspenning og underspenning bestemmer om vernet gir signal om frakobling.

I øydrifter med stor geografisk størrelse, kan en spenningsendring ta tid. Kun spenningsmåling kan dermed medføre en forsinket deteksjon, og egner seg ikke alene som øydriftsvern.

1.2 Konvensjonelt over-/underfrekvensvern

Frekvensen vil forandre seg i forhold til aktiv effektbalanse mellom generator og nett. Frekvensvernet finner nettets frekvens ved å måle avstanden i tid mellom spenningens nullgjennomganger.

Er frekvensen over eller under gitte grenseverdier, kobler vernet fra aggregatet.

Frekvensvernet egner seg ikke alene som øydriftsvern, da dette i noen situasjoner kan gi en forsinket deteksjon. Vernet trenger en del perioder (nullgjennomganger) for å detektere en øydrift. I noen situasjoner kan det hende at frekvensen ikke forandrer seg før etter lang tid. Eksempler på dette er hvis flere kraftverk er tilknyttet samme radial, og bidrar til å holde frekvensen innenfor akseptable grenser. I de tilfellene der lasten er tilnærmet like stor som produksjonen, kan en frekvensendring ta lang tid selv om kraftverket ikke har noe avansert regulatorsystem.

1.3 Endring i frekvens/RoCof – Rate of Change of frequency

RoCof- vernet måler på samme måte som frekvensvernet, avstanden mellom spenningens nullgjennomganger. Forskjellen er at RoCof finner endring i frekvens, dvs. endring per tidsenhet. Vernet kalles også df/dt - vern fordi det deriverer frekvensen med hensyn på tiden. Typisk stilles vernet inn i området fra 0,1 – 1,0 Hz/s.

RoCof- vernet er en utvidet frekvensovervåkning, og er mer pålitelig som anti- øydriftsvern. Det som hovedsakelig gjør RoCof til en bedre metode, er hurtigere detektering. Er det lite ubalanse i effekt mellom generator og nett, kan en frekvensendring ta tid. Som nevnt vil et konvensjonelt frekvensvern ha problemer med å detektere øydriften i en slik situasjon, mens et RoCof- vern kan oppdage hendelsen.

Et problem med RoCof- vernet kan være unødvendig frakobling ved forstyrrelser i nettet. Ved store lastavslag forårsaket av feil eller utkobling, kan frekvensen bli påvirket så mye at vernet misforstår. Vernet kan imidlertid blokkeres av et underspenningssignal hvis spenningen synker under et bestemt nivå. Dette gjør vernet mer driftsikkert ved kortslutninger. Det kan også legges inn en tidsforsinkelse før frakobling.

1.4 Andre metoder

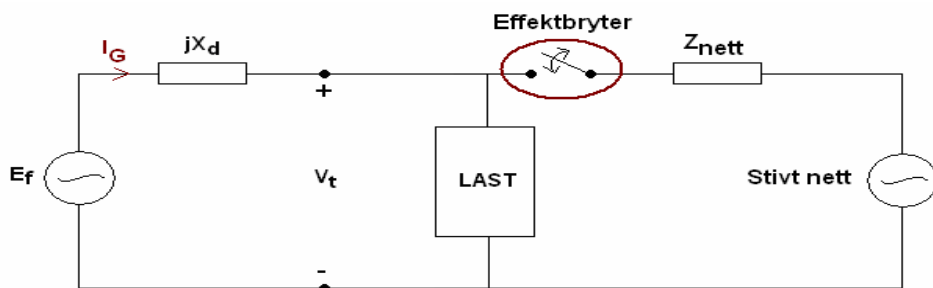
Det finnes en del andre metoder som ikke er like utbredt som de nevnt ovenfor. Disse vil ikke bli utdypet i denne rapporten, men er tatt med for å vise hva som finnes:

- a) Power fluctuation method - Baserer seg på endring i aktiv effektproduksjon.

- b) Endring i spenning/Rate of Change of Voltage - Detekterer endring i spenning per tidsenhet.
- c) Rate of Change of Power and Power Factor - En kombinasjon av endring i aktiv effekt og fasevinkel per tidsenhet.
- d) Retureffekt/Reverse power detection – Metoden kan kun brukes der lasten i området alltid er større enn produksjonen.
- e) Rate of change in voltage and changes in power factor - En kombinasjon av endring i spenning og effektfaktor per tidsenhet.
- f) Måling av reaktiv effektflyt/Reverse VAR detection - Denne metoden måler den reaktive effektflyten på generatorsiden. Aggregatet blir koblet bort hvis VAR- flyten ut av kraftverket overskrider en gitt grense. For å unngå unødvendige frakoblinger, er det implementert en tidsforsinkelse før frakobling.

1.5 Vektorskiftvernet

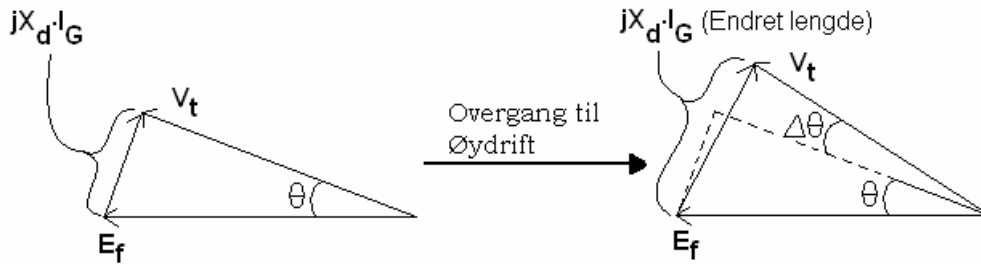
Dette vernet er undersøkt med simuleringer i PSCAD (EMTDC). Figur 1 viser synkrogeneratorens forenklete ekvivalentskjema tilkoblet et stivt nett. Øydriften fremkalles ved å åpne effektbryteren.



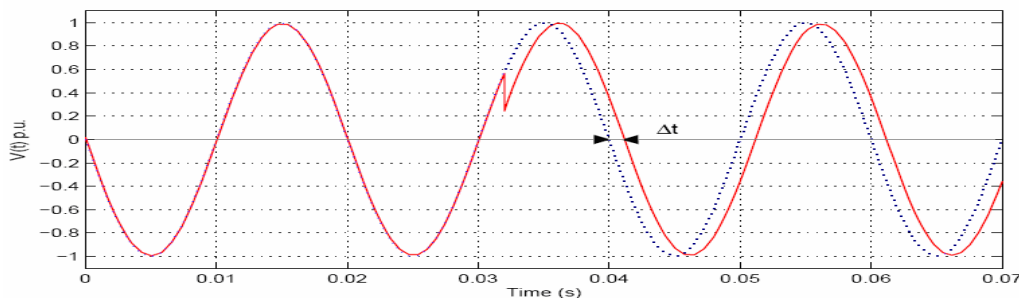
Figur 1 - Ekvivalentskjemaet til synkrogeneratoren tilkoblet et stivt nett

Vektorskiftvernet måler avstanden i tid mellom spenningens nullgjennomganger på generatorklemmene, og benytter seg av polhjulsvinkelendringen (vektorskiftet) i synkrogeneratoren. Med polhjulsvinkelen menes vinkelen mellom synkrogeneratorens indre spenning, E_f , og klemmespenningen, V_t (markert θ på Figur 2). Produktet av generatorstrømmen, I_G , og synkronreaktansen, jX_d , bestemmer polhjulsvinkelens størrelse.

Endringen av polhjulsvinkelen forårsakes av en aktiv effektubalanse i systemet, dvs. at lasten i nettet er forskjellig fra generatorens produksjon. Når hovednettet kobles bort, vil man få en endring i strøm gjennom synkrogeneratorens reaktans og følgelig fås en endring i generatorens polhjulvinkel. Er denne over en gitt grenseverdi, gir vernet signal om frakobling. Grenseverdiene er justerbare, vanligvis fra $2^\circ - 20^\circ$.



Figur 2 – Viserdiagram som viser polhjulsinkelen før og etter øydrift.



Figur 3 – Vektorskift ved overgangen til øydrift ($Load > Production$).

Økt polhjulsinkel fører til en tidsforskyvning, Δt , i spenningens nullgjennomgang (Figur 3). Vektorskiftvernet måler dette tidsavviket ved å sammenlikne nullgjennomgangen til målt tidsvarierende spenning med en memorert referanse. Den memorerte referansen oppdateres etter brukers ønske. Ofte ønskes det å oppdatere minnet etter hver halvperiode for å unngå uønsket frakobling ved forstyrrelser i nettet.

Figur 3 viser en tydelig polhjulsinkelendring ved overgang til øydrift der last er større enn produksjon. Er lasten mindre enn produksjonen, vil polhjulsinkelen reduseres.

Vektorskiftvernet er nært beslektet med RoCof- vernet nevnt tidligere i rapporten. Ofte benyttes en kombinasjonsløsning, og resultatet gir en mer driftsikker løsning.

2 SITUASJONER SOM IKKE GIR DETEKTERING

I denne delen vil kun vektorskiftvernet bli behandlet [1]. Ved bruk av passive målemetoder, kreves det forstyrrelser over en viss størrelse for å kunne observere en hendelse. På grunn av dette fungerer ikke passive metoder under alle øydriftssituasjoner. Problemet oppstår der man har effektbalanse mellom generator og nett, dvs. at lasten er lik produksjonen. En øydrift kan i slike situasjoner foregå i lang tid, selv om kraftverket ikke har noe avansert regulatorsystem. Et mål med dette arbeidet er å undersøke hvor stort dette problemet er og i hvilke

situasjoner øydrift ikke lar seg detektere ved hjelp av vektorskiftvernet.

Vektorskiftvernet skal gi detektering dersom aktivt effektforbruk er forskjellig fra aktiv effektproduksjon. Simuleringene gjort i studiet viser at det finnes situasjoner der man ikke får detektering, til tross for stor ubalanse i aktiv effekt mellom generator og nett. De neste kapitlene gir en kort forklaring på slike tilfeller.

2.1 Lastenes spenningsavhengighet

Hvordan vektorskiftet blir, avhenger av aktiv effekt, men den reaktive effekten er også av betydning. Dersom reaktivt effektforbruk er forskjellig fra reaktiv effektproduksjon, forandres spenningen ved overgang til øydrift. Som oftest får man mangel på reaktiv effekt, noe som fører til et spenningsfall i systemet. Hvordan vektorskiftet blir i en slik situasjon, avhenger av lastenes spenningsavhengighet. Man deler lasten inn i tre ulike kategorier (statisk last):

- Konstant impedans
- Konstant strøm
- Konstant effekt

En last med konstant impedanskarakteristikk varierer sitt effektforbruk proporsjonalt med kvadratet av spenningen. Ved konstant strømkarakteristikk trekker lasten konstant strøm, og effektvariasjonene vil ikke bli like påvirket av spenningsfluktuasjonene. Laster med konstant effektkarakteristikk er uavhengige av spenningen.

De ulike modelleringene ble gjort vha. en fiksert last som følger lastformelen (1). Det benyttes en tilsvarende formel for reaktiv effekt.

$$P = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{NP} \quad (1)$$

P_0 er merkeeffekten og U_0 er merkespenningen i nettet. Ved å endre eksponenten, NP, kan man styre lastene til å trekke konstant impedans (NP = 2), konstant strøm (NP = 1) eller konstant effekt (NP = 0). Simuleringer ble gjort i henhold til tabell 1 i referanse [6], der det oppgis eksponentverdier for ulike lasttyper (eksempelvis husholding). Det finnes også norsk litteratur om lastmodellering, men nyere data ble prioritert. Alle laster ble justert med en effektfaktor lik 0,98 (induktiv).

Siden lastene kan påvirkes ulikt av spenningsfluktuasjoner, har dette betydning for hvordan strømmen gjennom generatoren, og derav gjennom synkronreaktansen, utarter seg. Som nevnt under kapittel 1.5 fås en økning i polhjulsvinkelen ved last større enn produksjon, og

reduksjon ved last mindre enn produksjon. Dette er korrekt så lenge spenningen holder seg rundt nominell verdi. Oppstår en spenningsøkning/senkning, vil lasttype og evne til å holde på sitt effektforbruk være avgjørende. Med spenningsfall i systemet, vil eksempelvis ikke en konstant impedanslast kunne opprettholde sitt effektforbruk, og resultatet kan bli at strømmen gjennom generatoren synker selv om lasten i utgangspunktet var større enn produksjonen. Dette gir en mindre polhjulsvinkel. Med laster av typen konstant effekt eller konstant strøm, vil disse i større grad kunne opprettholde effektforbruket, og strømmen vil stige gjennom synkronreaktansen selv om spenningen synker som et resultat av øydrift. Dette gir en økt polhjulsvinkel.

2.2 Ikke- detekterbart vektorskiift

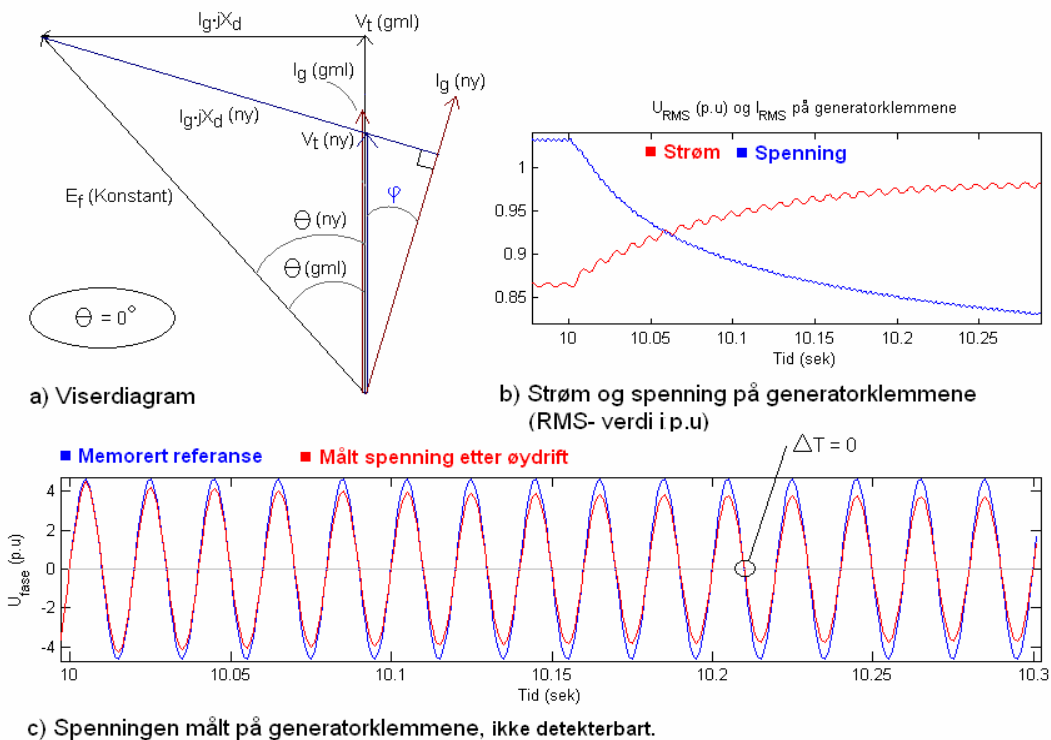
En uheldig balanse mellom generator og nett, kan føre til at vektorskiiftvernet ikke oppdager at øydrift har oppstått. Hvordan vektorskiiftet blir i de ulike situasjoner, er avhengig av endring i generatorstrøm, som igjen er avhengig av laststørrelse, lasttype og spenningen i systemet. Dette kan gjøre at vektorskiiftet blir annerledes enn forventet, og i verste fall kan det bli umulig å detektere. En slik situasjon med last større enn produksjon er vist i Figur 4.

Spenningskurven i c) viser at målt spenning og den memorerte referansen krysser nullgjennomgangen uten noen tidsforskyvning, $\Delta T = 0$. Den eneste forandringen er at målt spenningskurve har mindre amplitude enn referansen. Situasjonen er illustrert vha. et viserdiagram som viser at vektorskiiftet ikke er detekterbart, $\theta(gml) = \theta(ny)$. Forklaringen på situasjonen blir følgende:

→ Spenningen på generatorklemlene har sunket grunnet mangel på reaktiv effekt i systemet. Lastene forsøker i noen grad å opprettholde sitt effektforbruk, og strømmen øker gjennom generatoren. I prinsippet skulle det oppstått en økning i polhjulsvinkelen fordi strømmen øker, og dermed øker lengden av $jX_d \cdot I_g$. Siden spenningen ikke holder seg rundt nominell verdi, kompenserer denne for endringen ved at effektforbruket reduseres (strømmen øker ikke tilstrekkelig). Det oppstår en kortvarig likevekt mellom generator og nett.

Magnetiseringsspenningen, E_f , er den samme både før og etter øydrift i Figur 4a. Småkraftgeneratorene blir ofte levert med et børsteløst magnetiseringssystem, og dette forsinker en evt. spenningsregulering med opptil 300ms. Av denne grunn ble ikke simuleringene analysert

lenger enn denne perioden, og vektorskiftvernet forventes og ha gitt signal om øydrift i dette tidsrommet (avhengig av oppdateringsfrekvensen).



Figur 4 – Vektorskift som ikke detekteres med 7MW last mot 5MW produksjon (Laster med konstant impedanskarakteristikk). Øydriften oppstår ved tiden $t = 10$ sek.

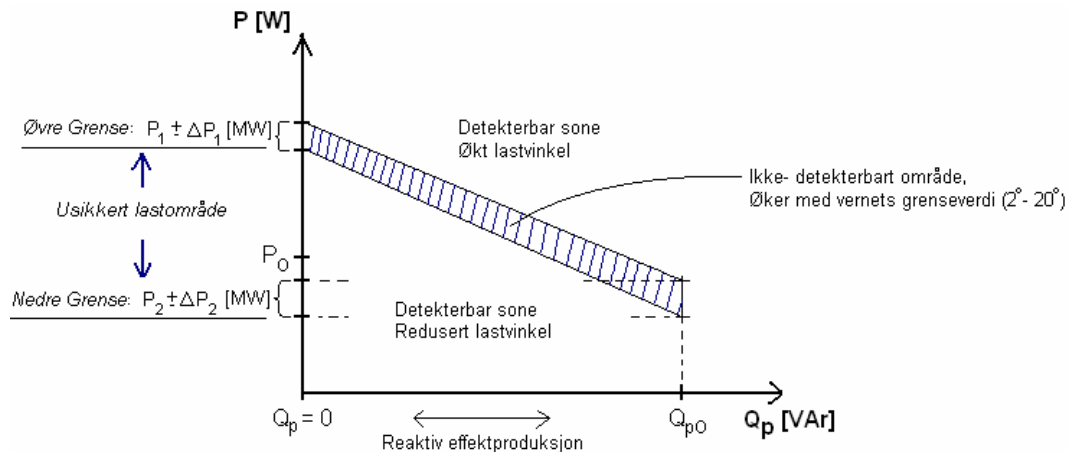
2.3 Usikkert lastområde for detektering

Mangel på reaktiv effekt er som nevnt årsaken til fall i nettspenningen. Figur 5 på neste side illustrerer hva som skjer ved en reaktiv ubalanse mellom generator og nett. Det er markert et *usikkert lastområde* der det risikeres å ikke få detektering.

Den skraverte sonen gir ingen detektering med vektorskiftvernet, fordi det her oppstår en likevektsstilling mellom generator og nett der det ikke genereres et målbart vektorskift, som vist i Figur 4. Over det skraverte området fås en økning i polhjulsvinkelen, og under en polhjulsvinkelreduksjon. *Nedre Grense* på figuren ($P_1 \pm \Delta P_1$ [MW]), angir det last- intervallet med aktiv effekt som ikke gir detektering når generatoren produserer eksakt den mengde reaktiv effekt som øydriftsområdet forbraker¹. I situasjoner med fullstendig balanse i

¹ Grunnen til at lastintervallet med fullstendig effektbalanse (nedre grense) ikke er på samme sted som produksjonen, P_0 , er pga. resistive tap i nettet. Lastene har i tillegg tendens til å trekke mer effekt enn det som står oppgitt, dersom spenningen er høyere enn 1,0 p.u.

reaktiv effekt, vil kun ubalanse i aktiv effekt være avgjørende om man får vektorskiift eller ikke.



- Q_p – Produksjon av reaktiv effekt.
- Q_{p0} – Den reaktive effektproduksjonen som tilsvarer øydriftområdets reaktive effektforbruk.
- P_0 – Nominell produksjon

Figur 5 – Skravert felt indikerer ikke- detekterbart område.

Størrelsen på lastintervallene ($\pm \Delta P$) som ikke gir detektering, vil variere med vernets innstilling. Bruker man minste innstilling på 2° , vil de fleste situasjoner detekteres, men vanligvis brukes større innstilling enn dette for å unngå uønsket frakobling ved forstyrrelser.

Mye av litteraturen om vektorskiiftvernet baserer seg kun på balansen i aktiv effekt, og ser bort ifra den reaktive effekten. Dersom man gradvis får en ubalanse i reaktiv effekt, dvs. at generatorens reaktive effektproduksjon blir gradvis mindre enn øydriftområdets reaktive effektbehov, stiger det skraverte området som ikke gir detektering mot større laster, frem til *Øvre Grense* ($P_2 \pm \Delta P_2$ [MW]) der generatoren ikke produserer reaktiv effekt. Årsaken er at mangel på reaktiv effekt medfører et spenningsfall og kompenserer for polhjulsvinkelendringen (Figur 4).

Det bør nevnes at et underspenningsvern kan ta hånd om en del av disse situasjonene. Undersøkelsen som presenteres her er kun konsentrert om vektorskiiftvernets oppførsel. Et videre studie vil være å undersøke hvordan ulike vernsammensetninger kan bidra til bedre detektering.

I de tilfeller der lasten er mindre enn produksjonen, får man omtrent alltid god detektering.

2.4 Størrelse på usikkert lastområde

I simuleringene ble det brukt tre ulike lastprofiler som ble modellert vha. formel (1):

- Laster med kun konstant impedanskarakteristikk.
- Laster representert av husholdning og kontorbygg.
- Laster dominert av industri.

Profilen med kun konstant impedanskarakteristikk, gir det såkalte ”verste tilfelle” på grunn av sin manglende evne til å holde på effektforbruket ved spenningsfluktuasjoner. Industrilastene bestod i stor grad av konstant effektkarakteristikk, mens husholdning og kontorbygg hadde en mellomtilstand av konstant strøm og konstant effekt.

Situasjonen i Figur 4 kan inntreffe ved alle typer last, men laststørrelsen som ikke gir detekterbart vektorskift vil variere med lastenes spenningsavhengighet. Dette ble observert ved at avstanden mellom *øvre* og *nedre* grense i Figur 5, kalt usikkert lastområde, ble mindre dersom lastene var i stand til å trekke konstant effekt. Tabell 1 viser størrelsen på det usikre lastområdet med de ulike lastprofilene. Det er først og fremst øvre grense som endres.

Lasttype	Usikkert område	Størrelse
Konstant impedans	$4,45 \pm \Delta P_1 \rightarrow 7,0 \pm \Delta P_2$ [MW]	2,55 MW
Husholdning/Kontorbygg	$4,67 \pm \Delta P_1 \rightarrow 5,9 \pm \Delta P_2$ [MW]	1,23 MW
Industri	$4,78 \pm \Delta P_1 \rightarrow 5,5 \pm \Delta P_2$ [MW]	0,72 MW

Tabell 1 - Størrelse på usikkert lastområde for detektering ved de ulike lastprofilene. Industrilastene trekker i stor grad konstant effekt.

Resultatet viser at større andel konstant effektforbruk, gir mindre usikkert område for detektering. Dette kommer av at mer konstant aktivt effektforbruk, medfører en større økning i strømmen på generatorklemmene etter øydrift. Med konstant impedanslaster og ingen reaktiv effektproduksjon, fås ikke tilstrekkelig strøm til å øke polhjulsinkelen før lasten er større enn 7MW, mens industrilastene kun trenger last større enn 5,5MW.

3 DISKUSJON/KONKLUSJON

Vektorskiftvernet fungerer stort sett tilfredsstillende, men er man uheldig fungerer ikke vernet i alle øydriftssituasjoner. Vernet skal gi detektering dersom aktivt effektforbruk er forskjellig fra aktiv effektproduksjon. Dette er korrekt så lenge spenningen holder seg rundt nominell verdi. Oppstår mangel på reaktiv effekt, fås et spenningsfall i

systemet. Dette skaper problemer ved at laster som i utgangspunktet er større enn produksjonen endrer sitt effektforbruk, og vektorskiftet blir ikke stort nok til detektering.

En kombinasjonsløsning med andre anti- øydriftsvern kan forbedre detekteringen. Ofte benyttes et samarbeid med RoCof- vernet nevnt i 1.3. Andre kombinasjonsløsninger kan eksempelvis være med vernet presentert i 1.4.f). Det usikre lastområdet i Figur 5 oppstår pga. ubalanse i reaktiv effekt, som fører til et spenningsfall i systemet. En kontinuerlig måling av reaktiv effektflyt, vil kanskje kunne overta detekteringen hvis vektorskiftvernet ikke gir signal i en øydrifts-situasjon.

I simuleringene ble det ikke sett på situasjoner der generatoren, før øydrift, forbruker reaktiv effekt (undermagnetisering).

Artikkelen bygger på studentens prosjektarbeid ved NTNU høsten 2006 [1]. Dette arbeidet skal videreføres i diplomoppgave våren 2007. Arbeidet er tilknyttet SINTEF-prosjektet ”Distribusjonsnett 2020” som er finansiert av Forskningsrådet, ABB, nettselskaper og annen industri.

4 REFERANSER

- [1] Muggerud, H.K., Detektering av Øydrift. Institutt for elkraftteknikk ved NTNU, 2006. (Rapport fra høstprosjekt 2006)
- [2] DTI., 2001. *Assessment of islanded operation of distribution networks and measures for protection* [Online], Tilgjengelig fra: <http://www.dti.gov.uk/files/file15099.pdf> [Hentet 25. august 2006].
- [3] Geidl, M., Swiss Federal Institute of Technology, 2005. *Protection of Power Systems with Distributed. Generation: State of the Art* [Online], Tilgjengelig fra: <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=bericht&nr=424&part=text> [Hentet 25. august 2006].
- [4] Freitas, W., 2005. *Comparative Analysis Between ROCOF and Vector Surge Relays for Distributed Generation Applications*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, April 2005.
- [5] Stråth, N., Lund University 2005. *Islanding Detection in Power Systems* [Online]. Tilgjengelig fra: <http://www.iea.lth.se/publications/Theses/LTH-IEA-1051.pdf> [Hentet 15. September 2006].
- [6] Price, W. W., *Load representation for dynamic performance analysis*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 2, May 1993.