

2017:00585 - Åpen

Rapport

Bruk av fordelingstransformator med automatisk trinnkobler

Guide til anskaffelse og drift

Forfatter

Magne Lorentzen Kolstad



SINTEF Energi AS

Postadresse:
Postboks 4761 Torgarden
7465 Trondheim

Sentralbord: 73597200
Telefaks: 73597250

energy.research@sintef.no
www.sintef.no/energi
Foretaksregister:
NO 939 350 675 MVA

Rapport

Bruk av fordelingstransformator med automatisk trinnkobler

Guide til anskaffelse og drift

EMNEORD:

Fordelings-
transformator med
automatisk trinnkobler,
netttilknytning av
småkraft,
spenningsregulering

VERSJON

1.0

DATO

2017-11-01

FORFATTER

Magne Lorentzen Kolstad

OPPDRAGSGIVER(E)

REN AS

OPPDRAGSGIVERS REF.

André Indrearne

PROSJEKTNR

506000645

ANTALL SIDER OG VEDLEGG:

29

SAMMENDRAG

Denne rapporten er ment som en guide for anskaffelse og drift av fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler. Rapporten beskriver potensiale for økning av tilknytningskapasiteten i nettet ved bruk av fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler og gir anbefalinger ved spesifisering av transformatorer og for hvordan spenningsregulatoren bør innstilles. Det er også vist erfaringer fra installasjon og drift av en fordelingstransformator med automatisk trinnkobler i Snefjellå i Rana kommune.

UTARBEIDET AV

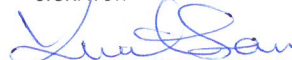
Magne Lorentzen Kolstad

SIGNATUR**KONTROLLERT AV**

Henning Taxt

SIGNATUR**GODKJENT AV**

Knut Samdal

SIGNATUR**RAPPORTNR**

2017:00585

ISBN

978-82-14-06729-3

GRADERING

Åpen

GRADERING DENNE SIDE

Åpen

Innholdsfortegnelse

1	Innledning	5
2	Fordelingstransformator med automatisk trinkobler	6
	2.1 Potensiale for å øke tilknytningskapasitet.....	6
3	Vurdering av tiltak	9
	3.1 Teknisk vurdering.....	9
	3.2 Økonomisk vurdering.....	10
	3.3 Praktisk eksempel	11
4	Spesifisering av transformator	18
	4.1 Ytelse.....	18
	4.2 Merkespenning og reguleringsområdet	18
5	Spenningsregulering	20
	5.1 Settpunkt for spenning	20
	5.2 Dødbånd.....	21
	5.3 Tidsforsinkelse	21
	5.4 Andre dødbånd og tidsinnstillinger.....	21
	5.5 Lastkompensering.....	22
	5.6 Distribuerte spenningsmålinger.....	22
6	Erfaringer fra demo	23
	6.1 Snefjellå.....	23
	6.2 Spenningskvalitet.....	23
	6.3 Andre erfaringer.....	26
7	Oppsummering og diskusjon	27
8	Referanser	28

1 Innledning

Denne rapporten er utarbeidet i prosjektet *DGnett – Alternative løsninger for integrasjon av distribuert produksjon*. Hovedmålet med prosjektet er å redusere kostnadene ved nettilknytning av distribuert produksjon gjennom å tilrettelegge for at ny teknologi og nye metoder tas i bruk av nettselskapene. På denne måten skal prosjektet bidra til at kraftsystemet, på en sikker og effektiv måte, kan håndtere videre utbygging av småkraft i Norge.

I flere tilfeller vil utbygging av distribuert produksjon utløse investeringsbehov grunnet begrenset tilknytningskapasitet i nettet. Tradisjonelt har begrensninger i tilknytningskapasitet i all hovedsak blitt løst ved bygging av nytt nett eller oppgradering av ledertverrsnitt. I de seneste årene har flere alternative løsninger for å øke tilknytningskapasiteten i nettet bli foreslått, men disse har av forskjellige grunner i liten grad blitt tatt i bruk i Norge.

Denne rapporten tar for seg bruk av fordelingstransformator med automatisk trinnkobler som alternativ til nettoppgradering. Rapporten er ment som en guide ved anskaffelse og drift av fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler og beskriver viktige momenter ved vurdering av tiltaket, spesifisering av transformatoren og innstilling av spenningsregulatoren til transformatoren. Målet er at det skal blir enklere for nettselskapene å ta i bruk fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler i tilfeller hvor dette er hensiktsmessig.

Rapporten beskriver også erfaringer fra installasjon og drift av en fordelingstransformator med automatisk trinnkobler i et nett hvor distribuert produksjon førte til store spenningsvariasjoner.

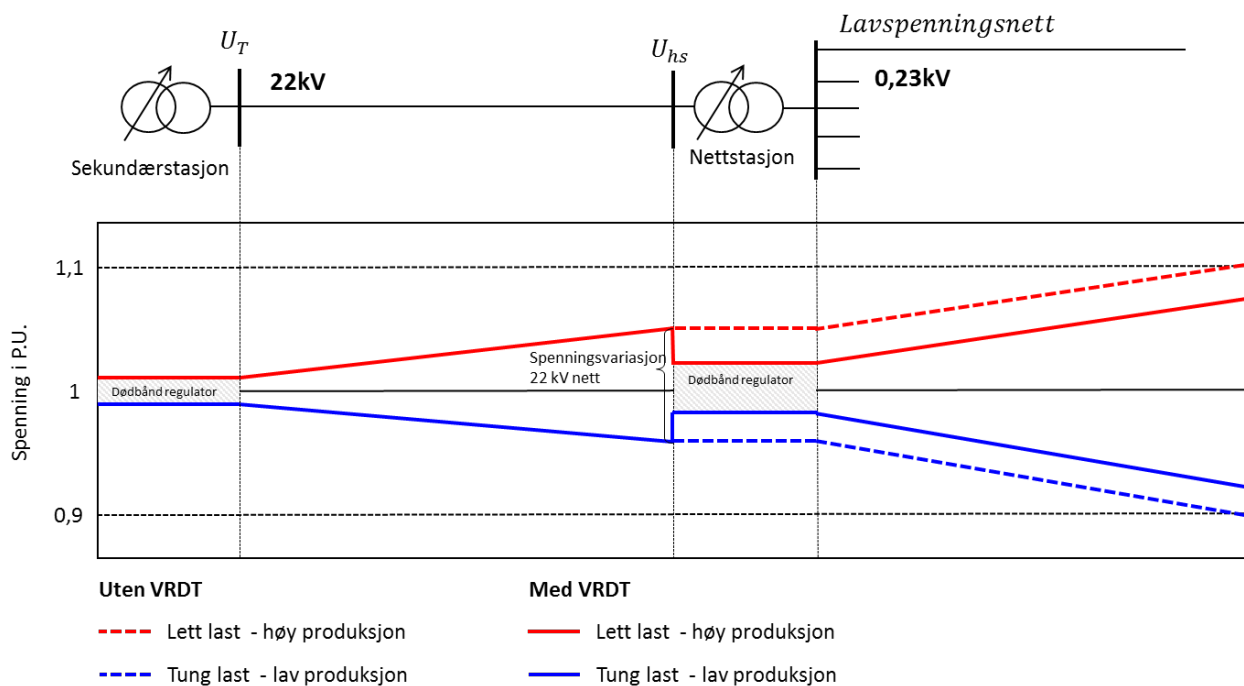
2 Fordelingstransformator med automatisk trinnkobler

Transformatorer med automatisk trinnkobler er kjent teknologi og benyttes flere steder i kraftsystemet, fortrinnsvis i regional- og sentralnettet. Flere leverandører har nå begynt å levere fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler. I motsetning til tradisjonelle fordelingstransformatorer kan trinnkobleren opereres med last og endre omsetningsforholdet til transformatoren automatisk for på den måten kontrollere spenningen på sekundærsiden av transformatoren.

ECOTAP VPD fra Maschinenfabrik Reinhausen er en av de mest populære trinnkoblerne til fordelingstransformatorer på markedet i dag. Denne kan leveres med nominell strøm lik 30 A eller 100 A. Det vil si at den kan benyttes til fordelingstransformatorer opp til 3,8 MVA. Den leveres med opptil 9 trinn som fritt kan arrangeres, for eksempel 6 trinn opp og 2 trinn ned, eller 4 trinn opp og 4 trinn ned. Trinnkobleren regulerer på høyspenningssiden av fordelingstransformatoren og maksimal størrelse på trinnene er 825 V. Normalt vil det benyttes en trinnstørrelse på mellom 1,5 % og 2,5 %.

2.1 Potensiale for å øke tilknytningskapasitet

Fordelingstransformator med automatisk trinnkobler kan være et alternativ for å øke tilknytningskapasiteten i nettet dersom denne er begrenset av for stor spenningsvariasjon. Bruk av fordelingstransformator med automatisk trinnkobler vil gjøre at eventuelle spenningsvariasjoner i høyspentnettet ikke forplanter seg til lavspenningsnettet. I perioder med høy spenning i høyspenningsnettet vil transformatoren kompensere for dette ved å øke vindingsforholdet og således redusere spenningen i lavspenningsnettet, mens i perioder med lav spenning i høyspentnettet vil transformatoren redusere vindingsforholdet og således øke spenningen i lavspenningsnettet. Dette er illustrert i Figur 1.



Figur 1 Langsomme spenningsvariasjoner i distribusjonsnettet med og uten fordelingstransformator med automatisk trinnkobler (VRDT – Voltage regulated distribution transformer).

Forskrift om leveringskvalitet i kraftsystemet (FoL) setter i dag krav om at langsomme variasjoner i spennings effektivverdi, målt som gjennomsnitt over ett minutt, skal holdes innenfor et intervall på $\pm 10\%$ av nominell verdi, i tilknytningspunkt i lavspenningsnettet. Det stilles i dag ingen krav med hensyn til spenningsvariasjonen i høyspentnettet. Bruk av fordelingstransformator med automatisk trinnkobler vil føre til at det kan tillates en større spenningsvariasjon i høyspenningnettet. I praksis kan det tillates spenninger i det høyspente distribusjonsnettet opp mot isolasjonsgrensen i nettet i områder hvor det kun er fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler. Bruk av fordelingstransformator med automatisk trinnkobler vil føre til økt tilknytningskapasitet i høyspentnettet dersom spenningsvariasjonen i høyspentnettet er større enn det totale dødbåndet til spenningsregulatorene til fordelingstransformatorene.

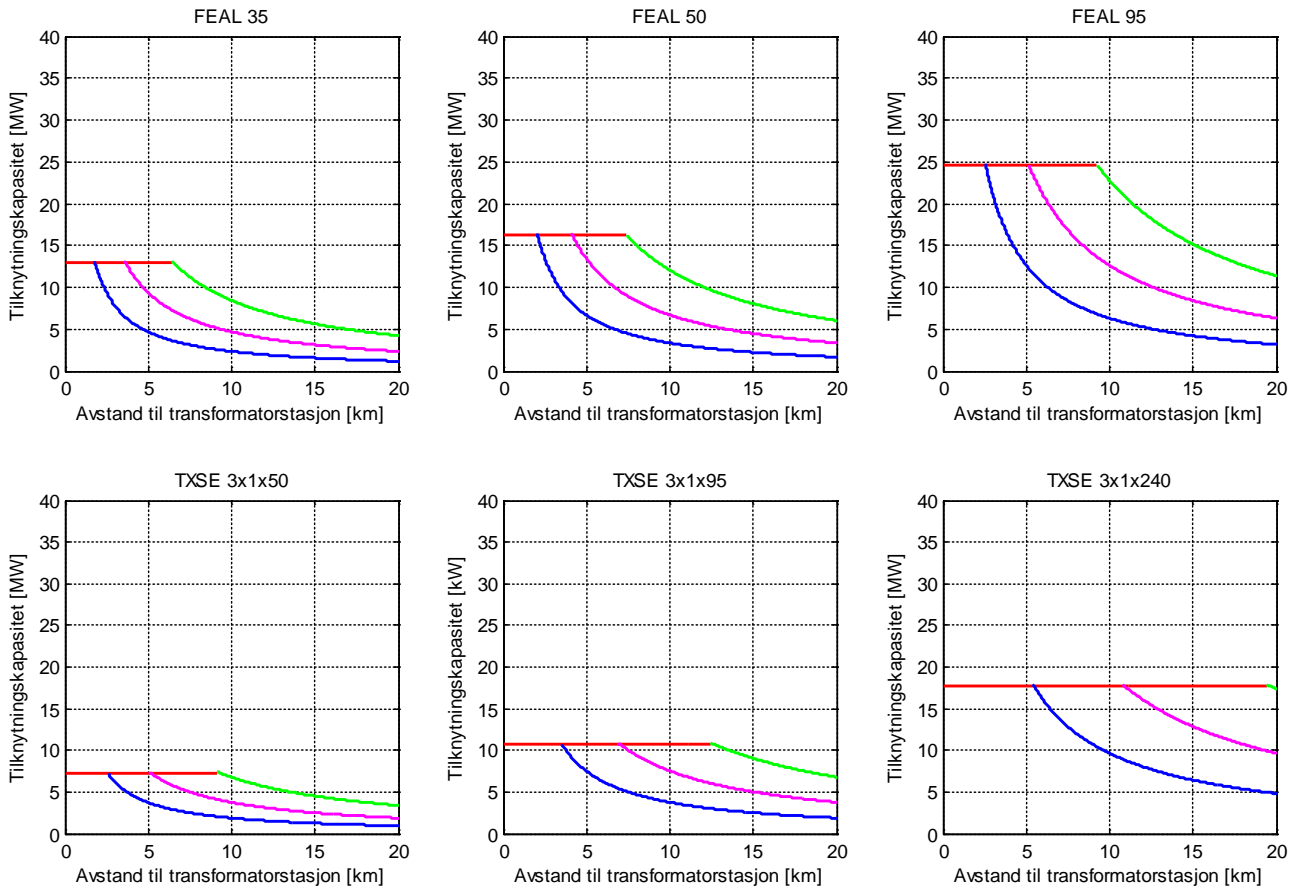
For å overholde krav til maksimal spenningsvariasjon ute hos kundene i lavspenningsnettet ved nettilknytning av ny produksjon i høyspent distribusjonsnettet, benytter nettselskapene i dag grenser for maksimal spenningsvariasjon i høyspentnettet. Dette gjøres for å forenkle analysene og på grunn av at nettselskapene ofte ikke har detaljerte modeller over lavspenningsnettet. Spesielt mangler ofte informasjon om trinnstilling til fordelingstransformatorer. I RENblad 3006 – Råd om nettanalyse, som brukes av flere nettselskaper, anbefales det at maksimal spenningsvariasjon i høyspentnettet ikke skal overskride 5% ¹. Det vil si at dersom spenningsfallet er $2,5\%$ i perioder med tung last og liten produksjon, er maksimal tillatt spenningsstigning $2,5\%$ i perioder med lett last og høy produksjon.

Figur 2 viser maksimal tilknytningskapasitet i 22 kV distribusjonsnett, for ulike typer linjer og kabler, ved maksimal tillatt spenningsstigningen som følge av innmating av produksjon på $2,5\%$, 5% og 9% . Ved maksimal tillatt spenningsstigning på $2,5\%$, viser figuren, at spenningsstigning er den begrensende faktoren for alle typer linjer for avstander over 3,1 km fra transformatorstasjonen. For kabler er spenningsstigning den begrensende faktoren for avstander over 6,4 km fra transformatorstasjonen. En økning i tillatt spenningsstigning fra $2,5\%$ til 5% vil føre til en dobling i tilknytningskapasitet dersom denne er begrenset av spenningsstigning. Dette kan også sees ut i fra formel (1), hvor P er tilknytningskapasitet, ΔU er tillatt spenningsstigning i prosent av nominell spenning, U_{nom} er nominell spenning og Z er impedansen til linjen. Her er last og reaktiv effekt neglisjert.

$$P = \frac{\Delta U \cdot U_{nom}}{Z} \quad (1)$$

Dersom det i et område kun benyttes fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler vil den maksimale tillatte spenningsstigningen i høyspenningnettet, som følge av innmating av effekt, kun begrenses av reguleringsevnen til transformatorene og isolasjonsgrensen i nettet. Isolasjonsgrensen i 22 kV nettet er normalt 24 kV. Det vil si at det kan tillattes en spenningsstigning på 9% .

¹⁾ Denne grensen inkluderer ikke trinning av overliggende transformator så i praksis tillattes det en noe høyere spenningsvariasjon.



Figur 2 Begrensning i tilknytningskapasitet i 22 kV distribusjonsnett for ulike typer linjer og kabler med tillatt spenningsstigning på 2,5 % (blå), 5 % (rosa) og 9 % (grønn). Rød linje indikerer begrensning som følge av strømføringsevnen til linjen/kabelen.

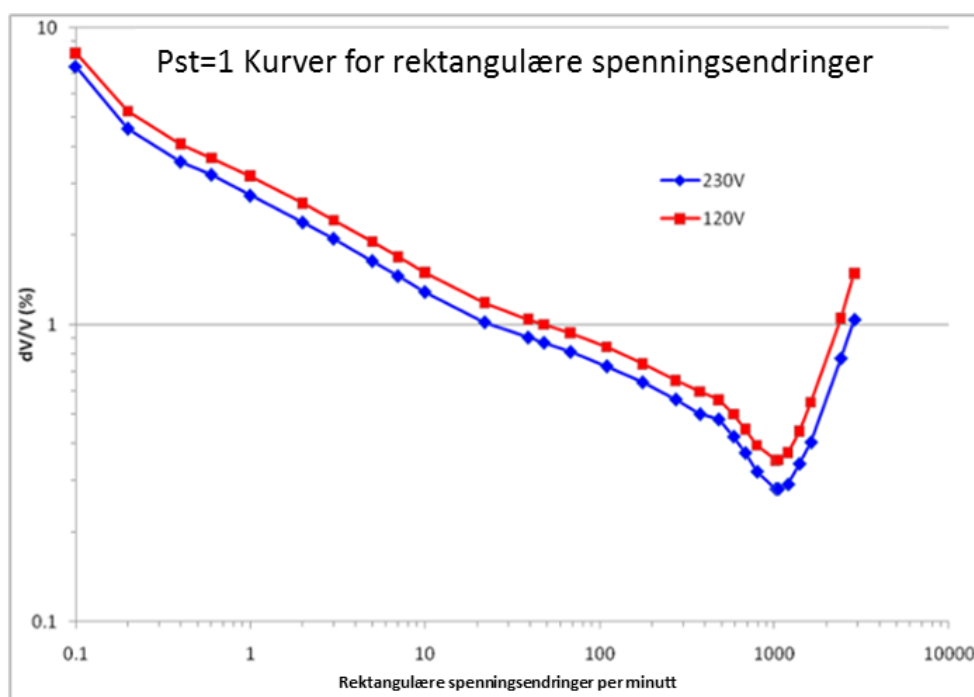
3 Vurdering av tiltak

3.1 Teknisk vurdering

Fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler kan være et alternativ til nettoppgradering i tilfeller hvor tilknytningskapasiteten er begrenset av for store langsomme spenningsvariasjon og ikke termiske grenser.

Forskrift om leveringskvalitet i kraftsystemet setter krav til at ingen kunder skal oppleve mer en 24 kortvarige over-/underspenninger eller hurtige spenningsendringer der den stasjonære- eller transiente spenningsendringen overskrider henholdsvis 3 % eller 5 % av nominelt spenningsnivå. Så lenge trinnstørrelsen er mindre enn 3 % vil ikke fordelingstransformator med automatisk trinnkobler føre til forskriftsbrudd på grunn av spenningsprang.

Hurtige spenningsvariasjoner eller spenningsfluktuasjoner er regulert indirekte i forskrift om leveringskvalitet gjennom grenseverdier for flimrer. Grenseverdien for korttidsintensitet av flimrer Pst er satt til 1,2 i 95 % av uken. Figur 3 viser kurver for Pst = 1 for rektangulære spenningsendringer. Figuren viser at selv med en trinnstørrelse på 3 %, vil transformatoren måtte trinne nesten en gang hvert minutt for at flimrerintensiteten skal overskride Pst=1. Fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler er kun ventet å trinne opp mot 10 ganger per dag og vil dermed ikke påvirke flimmernivået i nettet i betydelig grad.



Figur 3 Kurver for Pst=1 for rektangulære spenningsendringer.

Fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler har omtrent samme impedans som tradisjonelle fordelingstransformatorer og vil dermed ikke føre til noen endring i kortslutningsytelsen i nettet. I tilfeller hvor det er problemer med sikker utkobling grunnet lav kortslutningsytelse kan derfor nettoppgradering være å foretrekke.

Ofte kan usikkerhet rundt fremtidig produksjon og last være utfordrende for nettselskapene ved valg av tiltak. Når ny last eller produksjon utløser behov for tiltak i nettet vil det være hensiktsmessig med en koordinert nettløsning som også tar hensyn til andre planer i området. Ved ikke å ta hensyn til andre planer i området risikeres det at det velges en nettløsning som er for svak innen få år. På den andre siden risikerer nettselskapet å overinvestere dersom det viser seg at de andre planene i området aldri blir realisert.

Bruk av fordelingstransformator med automatisk trinnkobler kan være et bra alternativ for å øke tilknytningskapasiteten i tilfeller hvor det er stor usikkerhet rundt fremtidig utvikling i last og produksjon. På den måten kan beslutningen om en større nettoppgradering utsettes og risikoen for å velge en nettløsning som enten er underdimensjonert eller overdimensjonert i forhold til fremtidig behov reduseres. Dersom en senere nettoppgradering fører til at det er unødvendig med en regulerbar fordelingstransformator kan den flyttes til en annen lokasjon.

3.2 Økonomisk vurdering

For å sikre en samfunnsmessig rasjonell utbygging av kraftnettet, bør det gjennomføres en samfunnsøkonomisk analyse av ulike alternative tiltak ved behov for nettinvesteringer. Ifølge NVE skal følgende nytte og kostnadsvirkninger inngå i en samfunnsøkonomisk analyse av tiltak i kraftnettet:

- investeringskostnader, korrigert for ev. restverdi
- drifts- og vedlikeholdskostnader
- tapkostnader
- avbruddskostnader
- flaskehalskostnader

En fordelingstransformator med automatisk trinnkobler koster i dag mellom 2-5 ganger så mye som en tradisjonell fordelingstransformator. Kostnaden til selve trinnkobleren er uavhengig av størrelsen til transformatoren så prisforskjellen være mindre for transformatorer med høyere ytelse. Som et eksempel koster en 200 kVA transformator med automatisk trinnkobler i dag omkring 250 000 kr. Til sammenligning vier Tabell 1 beregnet investeringskostnad for utvalgte luftlinjer og kabel-anlegg inkludert grøftkostnad i høyspent distribusjonsnett (24 kV). Som vist i Figur 2 setter langsomme spenningsvariasjoner begrensninger i tilknytningskapasiteten dersom avstanden overskrider 3 km – 6 km fra kraftrtransformatoren. Å bytte til fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler kan dermed ofte medføre lavere investeringskostnader i forhold til nettoppgraderinger.

Tabell 1 Investeringer kostnader for utvalgte luftlinjer og kabelanlegg inkludert grøftkostnader for 24 kV nett [1].

Type	Kostnad
80-AL1/13-ST1A (FeAl nr. 50 6/1)	705 817 kr
111-AL1/19-ST1A (FeAl nr. 70 6/1)	754 963 kr
(FeAl nr. 95 SP. 22/7)	873 536 kr
TSLE/TSLF 3x1x50 Al	487 735 ¹ kr – 878 627 ² kr
TSLE/TSLF 3x1x95 Al	519 544 ¹ kr – 910 436 ² kr
TSLE/TSLF 3x1x240 Al	625 304 ¹ kr – 1 016 196 ² kr

¹) Lave grøftkostnader (Landsbygd), ²) Høye grøftkostnader (Byområde)

Trinnkoblerne designes for å tåle opptil 500 000 koblinger. Det vil si nesten 30 koblinger om dagen i 50 år. Dersom dette stemmer vil det i praksis bety at trinnkobleren vil være vedlikeholdsfri for hele levetiden til transformatoren. Drift- og vedlikeholdskostnader vil dermed være uendret.

Fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler har omtrent samme impedans som tradisjonelle fordelingstransformatorer og dermed samme tap. Automatisk trinnkobler i fordelingstransformatoren kan gjøre det mulig å drifte lavspentnettet med en noe høyere spenning og dermed redusere tapene i lavspentnettet, men denne effekten er trolig liten. Installasjon av fordelingstransformator med automatisk trinnkobler vil derfor i liten grad påvirke tapskostnadene i nettet. Bygging av nytt nett eller oppgradering av ledertverrsnitt vil derimot redusere impedansen i nettet og vil dermed også redusere overføringstapene. Hvor mye tapskostnadene vil reduseres ved nettoppgradering vil være avhengig av kraftprisen, hvor mye resistansen i nettet reduseres ved oppgradering, produksjonsprofilen til kraftverkene i nettet og lastprofilen til lastene i nettet.

Installasjon av fordelingstransformator med automatisk trinnkobler er ikke ventet å påvirke leveringspåliteligheten og dermed avbruddskostnadene i nettet. Bygging av nytt nett eller nettoppgraderinger kan derimot redusere avbruddskostnadene for eksempel dersom en linje i et værutsatt området erstattes med en kabel.

Flaskehalskostnader er ikke relevant i distribusjonsnettet.

3.3 Praktisk eksempel

Dersom bruk av fordelingstransformator med automatisk trinnkobler skal vurderes opp imot nettoppgraderinger vil normalt investeringskostnader og tapskostnader være de viktigste kostnadene, selv om avbruddskostnader kan være avgjørende i spesielle tilfeller.

I det følgende vises tre praktiske eksempler for å illustrere størrelsen på investeringskostnader og tapskostnader. Det er tatt utgangspunkt i et forenklet nett som vist i Figur 4, med ett kraftverk og fire nettstasjoner, hver på 200 kVA, tilknyttet på tampen av en linje i høyspent distribusjonsnettet. Eksisterende linje er antatt å ha en restlevetid på 10 år. I alle eksemplene er spenningsvariasjonen i 22 kV nettet for stor slik at det er behov for tiltak og følgende to alternativer blir vurdert:

- 1) Oppgradere ledertverrsnittet til linjen
- 2) Installere fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler i alle fire nettstasjoner og drifte nettet med høyere spenningsvariasjon i høyspentnettet. Eksisterende linje reinvesteres om 10 år.

De tre eksemplene viser to kraftverk med ulik produksjonsprofil for å illustrere hvordan dette påvirker tapskostnadene. Tabell 2 viser hvilke forutsetninger som er benyttet i eksemplene.

Investeringskostnader for nettoppgraderinger er hentet fra Tabell 1. Kostnader knyttet til rivning av den eksisterende linjen er satt til 100 000 kr per km. Ved installasjon av fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler er det antatt at det er mulig å benytte eksisterende nettstasjon og det er kun transformatoren som må byttes. Kostnaden for dette er satt til 250 000 kr per transformator i tråd med erfaringene fra innkjøp og installasjon av en slik transformator i DGnett prosjektet. Det er antatt at restverdien til den eksisterende linje er lik null.

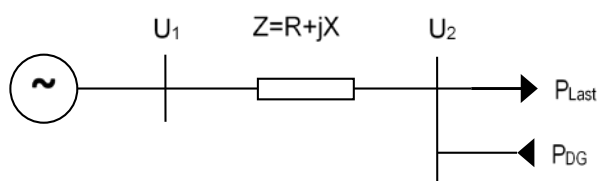
Tapskostnadene er beregnet ved å summere tapene for hver time over et år som vist i (5), hvor t er alle timene i ett år, R er resistansen i linjen og i er strømmen i linjen gitt av (6). Reaktiv effekt er neglisjert. Det er heller ikke satt noen pris på effekttapene i nettet da det er ventet at det er kraftverket som dekker tapene.

$$P_{tap} = \sum_{t=1}^{8760} i^2 * R \quad (2)$$

$$i = \frac{P_{Kraftverk} - P_{Last}}{U_n} \quad (3)$$

Tabell 2 Antagelser i kostnadsberegninger for alle eksempler.

Forutsetninger	
Diskonteringsrente	4 %
Strømpris	250 NOK/MW
Analyseperiode / avskrivningstid	30 år

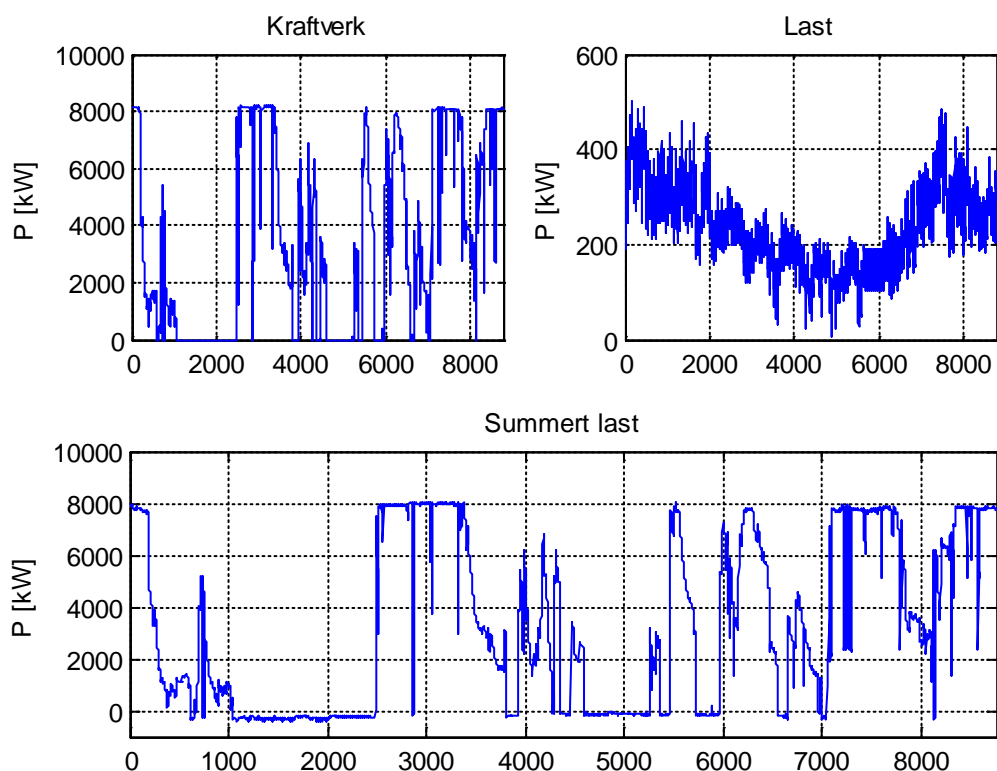


Figur 4 Forenklet nettmodell.

Produksjonsprofilene i eksemplene er hentet fra reelle småkraftverk, men lastprofilene er generert ved hjelp av lastprofiler i FASIT og temperaturdata fra Bardufoss.

3.3.1 Eksempel 1

I dette eksempelet er kraftverket og de fire nettstasjonene tilknyttet på tappen av en 10 km lang feral 50 linje. Figur 5 viser produksjonsprofilen og lastprofilen over ett år, samt den summerte lasten i linjen. Informasjon om produksjonen og den samlede lasten i nettet vises i Tabell 3.



Figur 5 Produksjon og last gjennom året, samt summert last i linjen i eksempel 1 og eksempel 3.

Tabell 3 Informasjon om last og produksjon i eksempel 1 og eksempel 3.

Kraftverk	
Maksimal produksjon	8,2 MW
Årlig produksjon	31 GWh
Last	
Maksimal last	500 kW
Årlig last	2 036 400 kWh

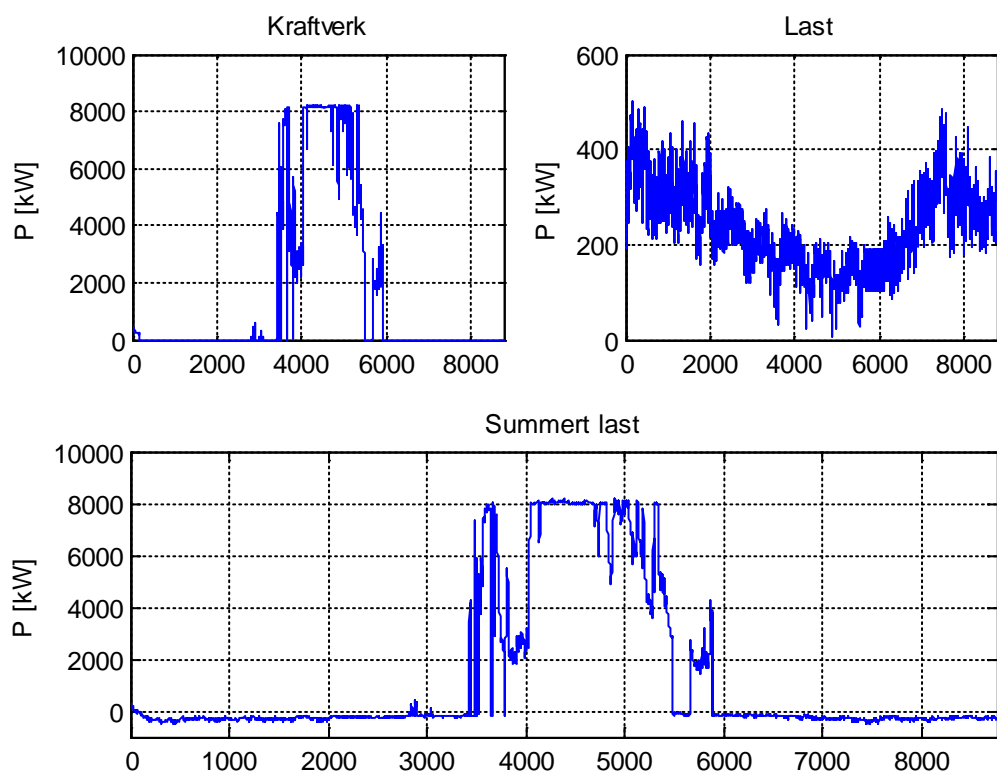
Tabell 4 viser kostnadsberegningene i eksempel 1. Resultatene viser at de årlige tapene reduseres med over 47 % i dersom ledertverrsnittet oppgraderes fra feral 50 til feral 95. Dette utgjør omkring 1 million kr i reduserte diskonterte tapskostnader over 30 år. I dette eksempelet er bruk av fordelingstransformator med automatisk trinnkobler 33 % rimeligere enn nettførsterkning. Dette er på grunn av at kostnader knyttet til bygging av nett er den dominerende kostnaden, og verdien av å kunne utsette denne kostnaden i 10 år er større enn verdien av reduserte overføringstap.

Tabell 4 Resultat fra analysen i eksempel 1.

	Nettforsterkning	Fordelingstransformator med automatisk trinnkobler
Beskrivelse	Oppgradering til Feral 95	Installere fordelingstransformator med automatisk trinnkobler. Reinvestere FeAl 50 linje om 10 år.
	Nåverdi	Nåverdi
Spenningsvariasjon 22 kV	3,2 %	6 %
Årlige tap	250 770 kWh	472 650 kWh
Investering år 0		
Investeringskostnad	8 735 360 kr	1 000 000 kr
Rivekostnad	1 000 000 kr	
Tapskostnader		
Årlige tapskostnader	62 693 kr	118 160 kr
Diskonterte tapskostnader	1 084 089 kr	2 043 227 kr
Reinvesteringskostnader år 10		
Investeringskostnad		7 058 170 kr
Rivekostnader		1 000 000 kr
Nåverdi reinvesteringskostnader		5 443 811 kr
Restverdi reinvestering		- 1 260 871 kr
Totale diskonterte kostnader	10 819 449 kr	7 226 166 kr

3.3.2 Eksempel 2

I dette eksempelet er kraftverket og de fire nettstasjonene, som i eksempel 1, tilknyttet på tampen av en 10 km lang feral 50 linje. Figur 6 viser produksjonsprofilen og lastprofilen over ett år, samt den summerte lasten i linjen. Informasjon om produksjonen og den samlede lasten i nettet vises i Tabell 5.



Figur 6 Produksjon og last gjennom året, samt summert last i linjen i eksempel 2.

Tabell 5 Informasjon om kraftverk og last i eksempel 2.

Kraftverk	
Maksimal produksjon	8,2 MW
Årlig produksjon	13,4 GWh
Last	
Maksimal last	500 kW
Årlig last	2 036 400 kWh

Tabell 6 viser kostnadsberegningene i eksempel 2. I dette eksempelet har kraftverket en mye lavere brukstid i forhold til i eksempel 2. Linjen får dermed også en lavere brukstid og reduksjonen i diskonterte tapskostnader bli dermed også lavere. I dette eksempelet er bruk av fordelingstransformator med automatisk trinnkobler 40 % rimeligere enn nettførsterkning. Eksempelet viser at en lavere brukstid på linjen vil favorisere bruk av fordelingstransformator med automatisk trinnkobler.

Tabell 6 Resultater fra analyse i eksempel 2.

	Nettforsterkning	Fordelingstransformator med automatisk trinnkobler
Beskrivelse	Oppgradering til Feral 95	Installere fordelingstransformator med automatisk trinnkobler. Reinvestere FeAl 50 linje om 10 år.
	Nåverdi	Nåverdi
Spenningsvariasjon 22 kV	3,2 %	6 %
Årlige tap	117 280 kWh	221 050 kWh
Investering år 0		
Investeringskostnad	8 735 360 kr	1 000 000 kr
Rivekostnad	1 000 000 kr	
Tapskostnader		
Årlige tapskostnader	29 320 kr	55 263 kr
Diskonterte tapskostnader	507 002 kr	955 601 kr
Reinvesteringskostnader år 10		
Investeringskostnad		7 058 170 kr
Rivekostnader		1 000 000 kr
Nåverdi reinvesteringskostnader		5 443 811 kr
Restverdi reinvestering		- 1 260 871 kr
Totale diskonterte kostnader	10 242 362 kr	6 138 540 kr

3.3.3 Eksempel 3

I dette eksempelet er kraftverket og de fire nettstasjonene tilknyttet på tampen av en 6 km lang feral 35 linje. Lasten og produksjonen er den samme som i eksempel 1. Produksjonsprofilen og lastprofilen over ett år, og informasjon om produksjonen og den samlede lasten i nettet vises henholdsvis Figur 5 og Tabell 3.

Tabell 7 viser kostnadsberegningene i eksempel 3. I dette eksempelet er den opprinnelige linjen kortere og har lavere tverrsnitt i forhold til i eksempel 1 og 2. Dette fører til lavere investeringskostnader for nettforsterkning, men investeringskostnadene for fordelingstransformator med automatisk trinnkobler forblir det samme. Det er antatt at det bygge FeAl 50 når eksisterende FeAl 35 linje skal reinvesteres, da det sjelden bygges mindre ledertverrsnitt enn dette i dag. Resultatene viser at de årlige tapene reduseres med 30 % dersom ledertverrsnittet oppgraderes fra FeAl 35 til feral 50, og 76 % dersom det legges TSLE/TSLF 3x1x240 Al kabel. Dette utgjør henholdsvis omkring 525 000 kr, og 1 325 000 kr i reduserte diskonterte tapskostnader over 30 år. I dette eksempelet er bruk av fordelingstransformator med automatisk trinnkobler 22 % rimeligere enn oppgradering til FeAl 50, mens oppgradering til TSLE/TSLF 3x1x240 Al kabel er 3 % rimeligere enn bruk av fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler. Eksempelet viser at korte avstander vil favorisere nettoppgradering. Det er i dette eksempelet antatt lave grøftkostnader.

Tabell 7 Resultater fra analysen i eksempel 3.

	Nettforsterkning	Nettforsterkning	Fordelingstransformator med automatisk trinnkobler
Beskrivelse	Oppgradere til FeAl 50	Oppgradere til TSLE/TSLF 3x1x240 Al	Installere fordelingstransformator med automatisk trinnkobler. Oppgradere til FeAl 50 linje om 10 år.
Spenningsvariasjon 22 kV Årlige tap	3,2 % 283 590 kWh	1,3 % 98 470 kWh	5,2 % 404 910 kWh (283 590 kWh) ¹
Investering år 0			
Investeringskostnad	4 529 772 kr	3 751 824 kr	1 000 000 kr
Rivekostnad	700 000 kr	700 000 kr	
Tapskostnader			
Årlige tapskostnader	70 878 kr	24 618 kr	101 228 kr (70 898 kr) ¹
Diskonterte tapskostnader	1 225 962 kr	425 687 kr	1 471 965 kr
Reinvesteringskostnader år 10			
Investeringskostnad			7 058 170 kr
Rivekostnader			1 000 000 kr
Nåverdi reinvesteringskostnader			5 443 811 kr
Restverdi reinvestering			- 1 260 871 kr
Totale diskonterte kostnader	6 455 734 kr	4 877 511 kr	5 049 285 kr

¹⁾ Verdier i parentes viser årlige tap og tapskostnader etter oppgradering til FeAl 50 i år 10.

4 Spesifisering av transformator

Spesifisering av en fordelingstransformator med automatisk trinnkobler vil i alle hovedtrekk være lik spesifisering av fordelingstransformatorer med manuell trinnkobler. Markedet for fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler vil nok være forholdsvis beskjedent i forhold til fordelingstransformatorer med manuelle trinnkoblere som nok vil være dominerende i nettet i mange år fremover. Et begrenset antall fordelingstransformatorer med automatiske trinnkoblere ute i nettet gjør at det vil være ekstra viktig å forsøke å redusere antallet ulike transformatorspesifikasjoner. Dette vil være en fordel både med tanke på tilgangen på reservedeler eller reservetransformatorer samt at økt standardisering vil øke sjansene for at fordelingstransformatoren vil kunne benyttes andre steder i nettet.

4.1 Ytelse

Det anbefales å kun benytte et begrenset antall standard størrelser. Økt standardisering av transformatorstørrelser er ventet å redusere utviklingskostnadene hos produsentene og dermed også prisen på transformatorer.

Ofte vil fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler erstatte en eksisterende fordelingstransformator. Fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler har omtrent samme dimensjoner som en tradisjonell fordelingstransformator med manuell trinnkobler og kan i de fleste tilfeller erstatte transformatoren i eksisterende nettstasjon uten større tilpassinger, men i enkelte tilfeller kan plass i eksisterende nettstasjon være en begrensning ved valg av transformatorytelse.

4.2 Merkespenning og reguleringsområdet

Det anbefales å benytte 240 V eller 415 V som standard merkespenning på sekundærsiden til transformatoren.

Reguleringsområdet til transformatoren bestemmes av antall og størrelse på trinn. Fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler kan være aktuelt både på steder med stor spenningsvariasjon grunnet høy last og på steder med stor spenningsvariasjon grunnet stor produksjon. Dersom en senere nettoppgradering fører til at det er unødvendig med en regulerbar fordelingstransformator kan den flyttes til en annen lokasjon. Transformatoren bør derfor spesifiseres slik at den kan benyttes både i nett med problemer med lav spenning, og i nett med problemer med høy spenning. Dette tilsier at transformatoren bør ha en symmetrisk trinnkonfigurasjon – like mange trinn opp som ned.

Transformatoren bør også spesifiseres slik at den har et tilstrekkelig stort reguleringsområde. Dette vil også være med på å gjøre transformatoren mer fleksibel med tanke på å kunne fungere flere steder i nettet. Bruk av fordelingstransformator med automatisk trinnkobler vil kun føre til lavere spenningsvariasjon i nettet dersom det totale dødbåndet til spenningsregulatoren i transformatoren er mindre enn spenningsvariasjonen på høyspenningssiden av fordelingstransformatoren. Det totale dødbåndet vil i stor grad bestemmes av størrelsen på trinnene. Dersom det velges en trinnstørrelse på 2 %, og dødbåndet settes lik trinnstørrelsen, vil det totale dødbåndet være 4 %. Dette vil i de fleste tilfeller gi tilstrekkelige marginer i lavspenningsnettet. I tilfeller hvor dette ikke er tilstrekkelig vil det i mange tilfeller være mulig å redusere dødbåndet ned mot 60 % av trinnstørrelsen (se kapittel 5.2). Dersom det fortsatt ikke er tilstrekkelig vil det mest sannsynlig være mer hensiktsmessig å gjøre andre investeringer, som for eksempel oppgradering av lavspenningsnettet. Tabell 8 viser maksimal og minimal spenning på sekundærsiden på transformatoren for ulike trinnkonfigurasjoner og maksimal og minimal tillat spenning i høyspentnettet for å holde spenningen innenfor dødbåndet til regulatoren. Dødbåndet er satt lik trinnstørrelsen.

Tabell 8 Maksimal og minimal spenning på sekundærsiden for ulike trinnkonfigurasjoner med dødbånd lik trinnstørrelsen, og maksimal og minimal tillatt spenning på høyspent siden for å oppnå ønsket variasjon på lavspent siden. Spenningsendring er oppgitt i % av nominell spenning.

		$\pm 4 \times 1 \%$	$\pm 4 \times 1,5 \%$	$\pm 4 \times 2 \%$	$\pm 4 \times 2,5 \%$
Nominell spenning sekundærside = 240 V	$U_{ls,max}$	242,4 V	243,6 V	244,8 V	246,0 V
	$U_{ls,min}$	237,6 V	236,4 V	235,2 V	234,0 V
	ΔU_{ls}	2,0 %	3,0 %	4,0 %	5,0 %
	$U_{hs,max}$	23,11 kV	23,67 kV	24,24 kV	24,81 kV
	$U_{hs,min}$	20,91 kV	20,37 kV	19,84 kV	19,31 kV
	ΔU_{hs}	10,0 %	15,0 %	20,0 %	25,0 %

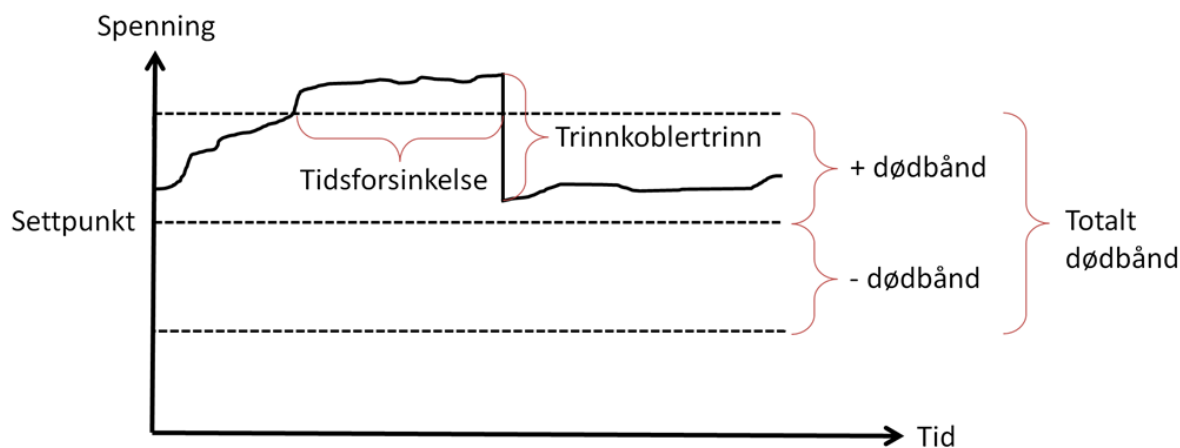
Anbefalt merkespenning og reguleringsområdet:

22 kV / 240 V +/- 4 x 2 %

22 kV / 415 V +/- 4 x 2 %

5 Spenningsregulering

Trinnkobleren styres ved å fastsette et settpunkt for spenningen, et dødbånd og en tidsforsinkelse for trinning. Trinnkobleren vil utføre en trinnkobling dersom spenningen på lavspenningsiden av transformatoren er utenfor det fastsatte dødbåndet i en periode lengre enn tidsforsinkelsen. Dette er illustrert i Figur 7.



Figur 7 Illustrasjon av betydning av ulike regulatorinnstillinger.

5.1 Settpunkt for spenning

Settpunkt for spenning fastsettes basert på spenningsprofilen i lavspenningsnettet. Settpunktet trenger ikke være det samme som transformatorens merkespenning. Det anbefales å sette settpunktet slik at man oppnår størst mulig margin til spenningsgrenser i FoL.

Størst mulig margin til spenningsgrenser ute i nettet:

$$U_{\text{Settpunkt}} = U_n + \frac{\Delta U_{\text{Is}}}{2} \quad (4)$$

U_n er nominell spenning (230 V/400 V) og ΔU_{Is} maksimal spenningsvariasjon i lavspenningsnettet (maksimalt spenningsfall i lavspenningsnett + eventuelt maksimal spenningsstigning i lavspenningsnettet).

Det er også mulig å justere settpunktet i henhold til lastsentrumet i lavspenningsnettet slik at flest mulig av kundene får en spenning nærmest mulig nominell spenning, men dette kan føre til at kunder tilknyttet nært nettstasjonen eller langt ut i nettet får henholdsvis unødig høy eller lav spenning.

5.2 Dødbånd

Innstilling av dødbåndet vil være avhengig av trinnstørrelsen, ønsket spenningsvariasjon på lavspentsiden av transformatoren, profilen til spenningsvariasjonen på høyspentsiden av transformatoren og i hvor stor grad det er ønskelig å begrense antall trinnkoblinger. Et smalt spenningsbånd vil føre til lavere spenningsvariasjon i lavspenningsnettet, men samtidig føre til at transformatoren trinner oftere.

Fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler er i dag mest utbredt på steder med problemer med høy spenningsvariasjon i høyspenningsnettet på grunn av mye distribuert solkraft tilknyttet i lavspenningsnettet, og produsentenes standard innstillinger for dødbåndet er basert på dette. Produksjonen fra solkraft i et område kan variere mye innenfor et døgn sammenlignet med produksjon fra små vannkraftverk. Dette fører til hyppigere variasjoner i spenningen og større behov for å begrense antall koblinger i transformatoren. I nett hvor spenningsvariasjonen i hovedsak skyldes innmating fra vannkraft vil spenningen være mer stabil gjennom døgnet og det er ikke samme behovet for å redusere antall trinnkoblinger. I slike tilfeller kan dødbåndet stilles noe smalere enn produsentens anbefaling dersom det er nødvendig.

Anbefalt:

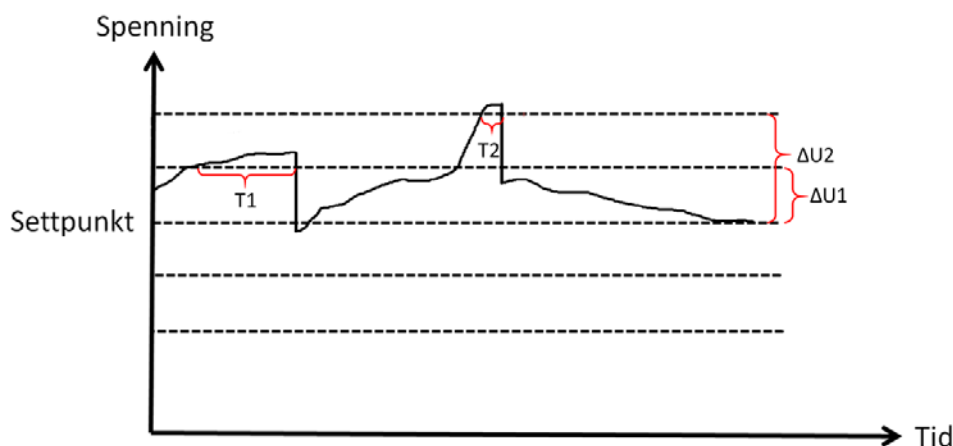
1. Følge produsentens standardverdier.
2. Kan stilles smalere ved behov.

5.3 Tidsforsinkelse

Tidsforsinkelsen settes for å hindre unødvendig trinning på grunn av hurtig forbigående endringer i spenningen. For å unngå at trinnkobleren i nettstasjonen trinner på grunn av spenningsendringer i regionalnettet anbefales det at tidsforsinkelsen er lengre enn tidsforsinkelsen i trinnkoblerregulatoren i sekundærstasjonen så lenge dette gir akseptable spenninger til alle kunder.

5.4 Andre dødbånd og tidsinnstillinger

Enkelte spenningsregulatorer har flere muligheter for innstilling av dødbånd og tidsforsinkelser. Det er vanlig å kunne stille inn to dødbånd med tilhørende tidsforsinkelse før trinning. Transformatoren kan dermed settes til å trinne hurtigere dersom spenningen avviker mye fra settpunktet. Dette er illustrert i Figur 8.



Figur 8 Eksempel på trinning av transformator med to dødbånd med tilhørende tidsforsinkelse.

Det anbefales å sette dødbånd 2 lik $2 * \text{trinnsstørrelsen}$ og med en tidsforsinkelse på 1-2 s. Enkelte spenningsregulatorer kan også ha andre muligheter for innstilling tidsforsinkelse.

5.5 Lastkompensering

Enkelte spenningsregulatorer har mulighet til å endre sett-punkt for spenning basert på laststrømmen i transformatoren. Det vil si at i perioder med høy last og dermed stort spenningsfall vil transformatoren øke spenningen på lavspenningsssiden av transformatoren, mens i perioder med lav last og lite spenningsfall, eventuelt også spenningsstigning som følge av produksjon, til transformatoren redusere spenningen på lavspenningsssiden av transformatoren.

En slik regulering er mest aktuell dersom det er stor spenningsvariasjon i lavspenningsnettet på grunn av distribuert produksjon tilknyttet i lavspenningsnettet. Gitt at laveste og høyeste spenning i lavspenningsnettet ikke opptrer på samme tid vil bruk av lastkompensering føre til økt tilknytningskapasitet i lavspenningsnettet sammenlignet med fast spenning på samleskinnen. Bruk av lastkompensering vil ikke påvirke tilknytningskapasiteten i høyspent distribusjonsnett. Dersom det er flere avganger under nettstasjonen som har ulik lastsammensetning, kan det vært vanskelig å finne riktig innstillinger.

5.6 Distribuerte spenningsmålinger

Enkelte spenningsregulatorer har mulighet for å regulere spenningen basert på målinger fra distribuerte spenningsmålere plassert ute i nettet. En slik regulering er også mest aktuell for å øke tilknytningskapasiteten i lavspenningsnettet og vil ikke påvirke tilknytningskapasiteten i høyspentnettet.

6 Erfaringer fra demo

6.1 Snefjellå

I forbindelse med DGnett prosjektet gikk Helgelands Kraft til anskaffelse av en fordelingstransformator med automatisk trinnkobler som ble satt i drift i Snefjellå i Rana kommune. I dette området var det problemer med stor spenningsvariasjon for kundene tilknyttet én nettstasjon på tampen av en 22 kV radial. De store spenningsvariasjonene skyldtes blant annet innmating fra et kraftverk lokalisert i nærheten av nettstasjonen på tampen av radialen, samt stor variasjon på samleskinnen i krafttransformatoren. Målet med demonstrasjonen var å vise at fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler kan være et alternativ til nettoppgradering for å øke tilknytningskapasiteten i nettet og avdekke eventuelle praktiske utfordringer.

Fordelingstransformatoren med automatisk trinnkobler ble satt i drift den 7.12.2016. Den hadde omtrent samme mål som den eksisterende fordelingstransformatoren så den eksisterende nettstasjonen kunne benyttes. Fire montører brukte en dag på å installere og sette i drift den nye transformatoren. Måleinstrumentet på høyspenningssiden av transformatoren ble skadet under installasjonen av den nye transformatoren og det mangler derfor målinger en periode før instrumentet ble erstattet.

6.2 Spenningskvalitet

Dette avsnittet viser målinger gjort på høyspentsiden og lavspentsiden av fordelingstransformatoren, før og etter fordelingstransformatoren med automatisk trinnkobler ble installert. Både spenning og strøm er målt med Elspec-instrumenter på begge sider av transformatoren, fra og med 13.4.2016, det vil si 8 måneder før den nye transformatoren ble installert.

Spenningsprang

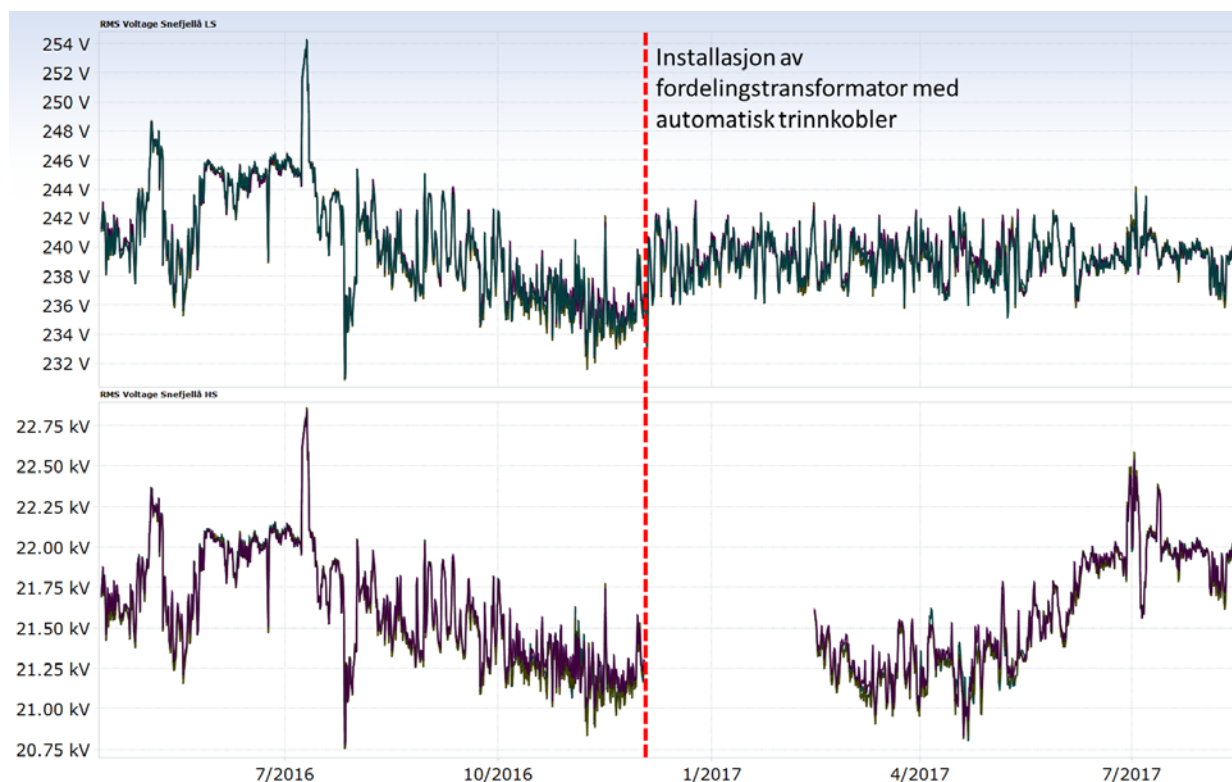
Trinnstørrelsen til fordelingstransformatoren i Snefjellå er på 2 %. Transformatoren vil dermed ikke kunne forårsake spenningsprang.

Langsomme spenningsvariasjoner

Figur 9 viser 10 minutts gjennomsnitt av linjespenning på sekundærsiden og primærsiden av transformatoren både før og etter installasjon av den nye fordelingstransformatoren med automatisk trinnkobler. Måleperioden er fra 13.4.2016 til 17.8.2017 og transformatoren ble installert 7.12.2016.

Store variasjoner i spenningen gjennom året var hovedgrunnen til at denne nettstasjonen ble valgt for å demonstrere fordelingstransformator med automatisk trinnkobler. Målingene viser at spenningen til tider har vært over 253 V på lavspenningssiden av transformatoren, mens den laveste spenningen var omkring 231 V. Det vil si en spenningsvariasjon på om lag 10 %. Det er ikke utført målinger lenger ut i nettet for å undersøke den laveste spenningen i transformatorkretsen.

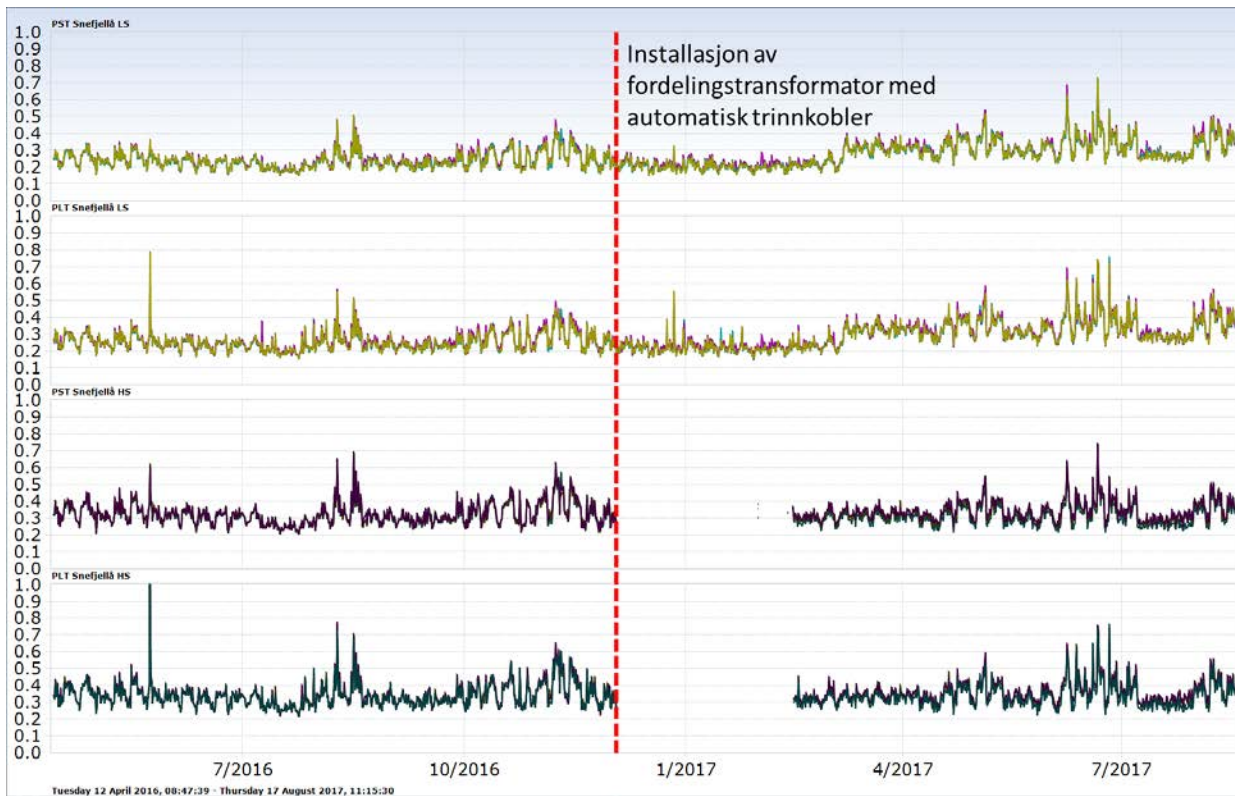
Målingene viser at transformatoren lykkes med å holde spenningen innenfor dødbåndet til regulatoren selv om det fortsatt er stor variasjon i spenningen på høyspenningssiden av transformatoren.



Figur 9 10 minutts gjennomsnitt av linjespenning på sekundærsiden (øverst) og primærsiden (nederst) av transformatoren før og etter installasjonen av ny transformator med automatisk trinnkobler.

Flimmer

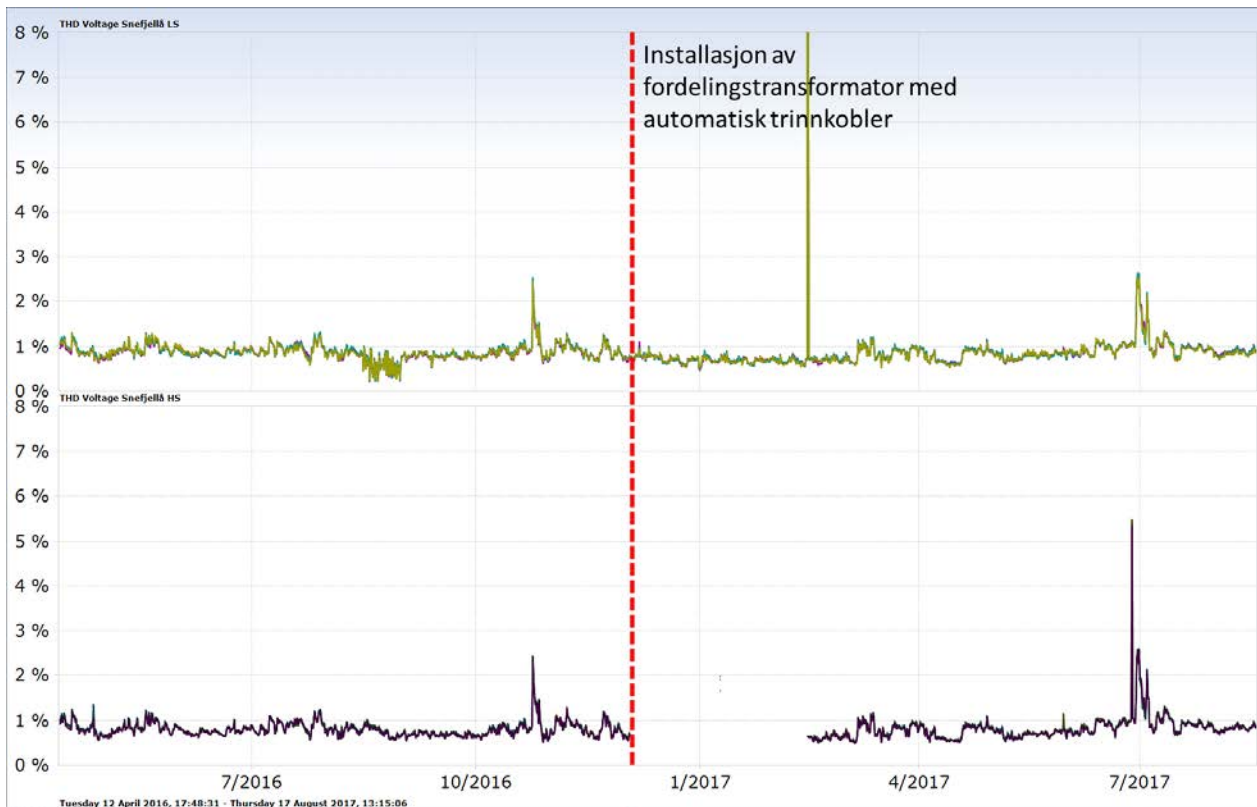
Figur 10 viser korttidsintensitet av flimmer (P_{ST}) og langtidsintensitet av flimmer (P_{LT}) på primær- og sekundærsiden av fordelingstransformatoren. Målingene viser at installasjon av fordelingstransformatoren med automatisk trinnkobler ikke har påvirket flimmerverdiene i nettet. Flimmerverdiene i nettet ligger godt innenfor kravene i forskriften.



Figur 10 P_{ST} og P_{LT} på sekundærsiden (øverst) og primærsiden (nederst) av transformatoren før og etter installasjonen av ny transformator med automatisk trinnkobler.

Harmoniske spenninger

Figur 11 viser spenningens totale harmoniske forvrengning (THD) på primær- og sekundærsiden av fordelingstransformatoren. Målingene viser at installasjonen av fordelingstransformatoren med automatisk trinnkobler ikke har påvirket spenningens THD. Spikeren som vises i THD på lavspenningssiden den 14/2 er på grunn av et kort avbrudd i spenningen.



Figur 11 10 minutts gjennomsnitt av THD på sekundærsiden (øverst) og primærsiden (nederst) av transformatoren før og etter installasjonen av ny transformator med automatisk trinnkobler.

6.3 Andre erfaringer

Trinnkobleren har en tellemekanisme som teller antall trinnkoblinger. Tabell 9 viser en oversikt over antall trinnkoblinger de første drøye ni månedene i drift. Tellerverket sto på 548 når transformatoren ble satt i drift. Tabellen viser at trinnkobleren trinnet relativt sjelden. I følge Maschinenfabrik Reinhausen, som er en stor produsent av trinnkoblere til fordelingstransformatorer og som også har produsert trinnkobleren i Snejfjellå, trinnet fordelingstransformatorene de har i drift i Tyskland i gjennomsnitt 10 ganger per dag. At fordelingstransformatorer i Snejfjellå skulle trinnet mindre enn dette var forventet da spenningsvariasjonen i Snejfjellå i stor grad varierer med produksjon i nærliggende vannkraftverk. Dette tilsier at dødbåndet i spenningsregulatoren kan stilles noe smalere enn produsentens anbefalinger dersom dette skulle være nødvendig.

Tabell 9 Oversikt over antall trinnkoblinger.

Dato for avlesning	Avlesning	Antall koplinger i perioden	Koplinger per dag i perioden
07.12.2016	548	0	
16.03.2017	634	86	0,87
13.06.2017	740	106	1,19
21.09.2017	819	79	0,79
Sum		271	0,94

7 Oppsummering og diskusjon

Fordelingstransformator med automatisk trinnkobler kan være et godt alternativ til nettoppgradering i tilfeller hvor tilknytningskapasiteten i nettet er begrenset på grunn av for store langsomme spenningsvariasjoner og kun et begrenset antall nettstasjoner er berørt.

Om fordelingstransformator med automatisk trinnkobler bør velges fremfor for eksempel nettoppgradering bør bestemmes basert på en teknisk-økonomisk analyse. Enkle beregninger utført i denne rapporten viser at fordelingstransformator med automatisktrinnkobler i flere tilfeller kan være en rimeligere løsning sammenlignet med oppgradering av ledertverrsnitt. Grunnen til dette er at investeringskostnaden for oppgradering av ledertverrsnitt ofte er stor sammenlignet med de reduserte tapskostnadene som følge av oppgraderingen. Faktorer som taler for bruk av fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler er:

- Lang restlevetid eksisterende nett
- Høye investeringskostnader for nettoppgradering (lang linje/kabel)
- Få berørte nettstasjoner
- Lav brukstid på nettet

Bruk av fordelingstransformator med automatisk trinnkobler kan også være et godt alternativ for å øke tilknytningskapasiteten i tilfeller hvor det er stor usikkerhet rundt det fremtidige nettbehovet. På den måten kan beslutningen om en større nettoppgradering utsettes og risikoen for å velge en nettløsning som enten er underdimensjonert eller overdimensjonert i forhold til fremtidig behov reduseres.

Det er i denne rapporten gitt anbefalinger til spesifisering av fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler. Ved anskaffelse av fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler anbefales det å i størst mulig grad benytte seg at et begrenset antall transformatorspesifikasjoner med tanke på tilgang til reservetransformatorer og reservedeler. Det vil være nyttig å spesifisere transformatoren med tanke at den skal kunne benyttes også andre steder i nettet.

I kapittel 5 er det gitt anbefalinger til innstilling av spenningsregulatoren til fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler. Valg av parametere i spenningsregulatoren vil være en avveining mellom ønsket om et smalt spenningsbånd på lavspenningssiden av transformatoren og ønsket om å begrense antall trinnkoblinger.

Det er ikke ventet at bruk av fordelingstransformatorer med automatisk trinnkobler vil ha noen vesentlig negativ innvirkning på spenningskvaliteten. Målinger av spenningskvaliteten i Snefjellå før og etter installasjon av fordelingstransformator med automatisk trinnkobler bekrefter dette.

8 Referanser

- [1] SINTEF Energi, "Planleggingsbok for kraftnett - Systematikk ved planlegging av kraftnett," SINTEF Energi, Trondheim2010.



Teknologi for et bedre samfunn

www.sintef.no