

www.sintef.no



REFERANSESIDE

Rapportens tittel: SPENNINGSREGULERING I HØYSPENNINGS- OG LAVSPENNINGS FORDELINGSNETT	Dato : 1987-02-25 Gradering : Apen
Saksbehandlere: Kjell Sand <i>KJS</i> Gerd Kjølle <i>GK</i> /kf	Prosjektnr. : 250067.00 Arkivnr. : 8523480 Antall sider: 25 Opplag : 11

Faggruppe: Overføring og fordeling Lars Rolfseng <i>LR</i>	Avdeling: Energiforsyningssystemer Sverre Aam <i>SAA</i>
----------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------

Oppdragsgiver: NTNF	Oppdragsgivers ref.: EK 0301.17007
----------------------------	-------------------------------------------

4 emneord à maks. 23 karakterer energiøkonomisering	spenningsregulering
kompondering	omsetningsforhold

Referat: Ved å drive høyspennings- og lavspenningsfordelingsnett med så høy spenning som mulig, kan tapene reduseres. Spenningen kan bl.a. reguleres v.h.a. automatisk styrte trinnkopplere i innføringsstasjonene. Det er skissert to metoder for beregning av optimale regulatorparametre og innstilling av omsetningsforhold for fordelingstransformatorene.

S A M M E N D R A G S R A P P O R T

Formålet med spenningskontroll i høyspennings- og lavspenningsfordelingsnett vil i energiøkonomiserings-sammenheng være å redusere tapene. Dette oppnås ved å drive nettet med så høy spenning som mulig under forutsetning av at leveringsbetingelsene tilfredsstilles og at isolasjonsnivået ikke overskrides.

Dersom spenningen i fordelingsnettet heves med gjennomsnittlig 1%, oppnås ca. 2% reduksjon i energitap. Med utgangspunkt i forbruk til alminnelig forsyning i 1985 tilsvarer dette 119 GWh for Norge som helhet. I tillegg kommer reduserte effekttap.

Automatisk styrte trinnkoplere i innføringsstasjonene kan anvendes til direkte regulering av spenningen i høyspenningsnett. Det er skissert ulike metoder for beregning av optimale regulatorparametre, dvs. regulerspenning (referansespenning) og kompondering, ut fra to forskjellige kriterier:

1. Minimalisere spenningsvariasjonene hos forbruker ved at spenningen holdes konstant i belastningstyngdepunktet.
2. Maksimalisere spenningsnivået i nettet (minimum tap).

Det er utarbeidet "algoritmer" som kan tilpasses et generelt lastflytprogram.

I N N H O L D S F O R T E G N E L S E

<u>Seksjon</u>	<u>Side</u>
1 INNLEDNING	1
2 REGULERING V.HJ.A. TRINKOPLER	2
3 KRITERIER FOR REGULERING AV SPENNING I INNFØRINGSSTASJON . .	4
4 BEREGNING AV REGULERSPENNING	8
4.1 MINIMAL SPENNINGSVARIASJON HOS FORBRUKER	8
4.2 MINIMALISERING AV TAP	12
4.2.1 Optimal regulering ved lineært spenningsfall	12
4.2.2 Optimal regulering ved ikke-lineært spenningsfall	15
4.2.3 Algoritme for beregning av optimal kompondering for transformator i innføringsstasjon og optimal innstilling av omsetningsforhold for fordelingstransformatorene	16
5 BEREGNING AV ENERGIGEVINST	21

1 INNLEDNING

Formålet med spenningskontroll i høyspennings- og lavspenningsfordelingsnett vil i energiøkonomiserings-sammenheng være å redusere tapene og å bedre utnyttelsen av fordelingsnettet. Det er ønskelig å drive nettet med så høy spenning som mulig innenfor rammebetingelsene.

Både i lav- og høyspenningsnettet vil det være restriksjoner med hensyn til spenningsnivå. Spenningsnivået må ikke overskride det maksimalt tillatte som er gitt av isolasjonstekniske årsaker. Videre er det et krav at leveringsbetingelsene tilfredsstilles over året. Spenningen hos forbruker skal verken være for høy eller for lav.

Det økonomiske aspektet ligger i muligheten for innspart energi som følge av reduserte tap. I 1985 var forbruket av elektrisk kraft til alminnelig forsyning 57735 GWh. Tapene i fordelingsnettet var i underkant av 6000 GWh. Dersom spenningen i fordelingsnettet heves med gjennomsnittlig 1%, gir dette ca. 2% reduksjon i energitap, eller 119 GWh. Med en gjennomsnittlig ekvivalent årskostnad for energitap på 25 øre/kWh, vil verdien av reduserte tap bli bortimot 30 millioner kroner pr. år.

Direkte regulering av spenningen i høyspenningsnettet kan oppnås ved anvendelse av automatisk styrte trinnkopplere i innføringsstasjonene. Planleggingsoppgaven i denne sammenheng er å bestemme optimale regulatorparametre, dvs. referansespenning og kompondering. Spenningsforholdene i lavspenningsnettet påvirkes i tillegg til nevnte regulering dessuten av omsetningsforhold for fordelingstransformatorene i nettet. Oppgaven her er å finne fram til en hensiktsmessig innstilling av dette forholdet.

2 REGULERING V.HJ.A. TRINNKOPLER

Figur 1 viser prinsippet for transformatorregulering

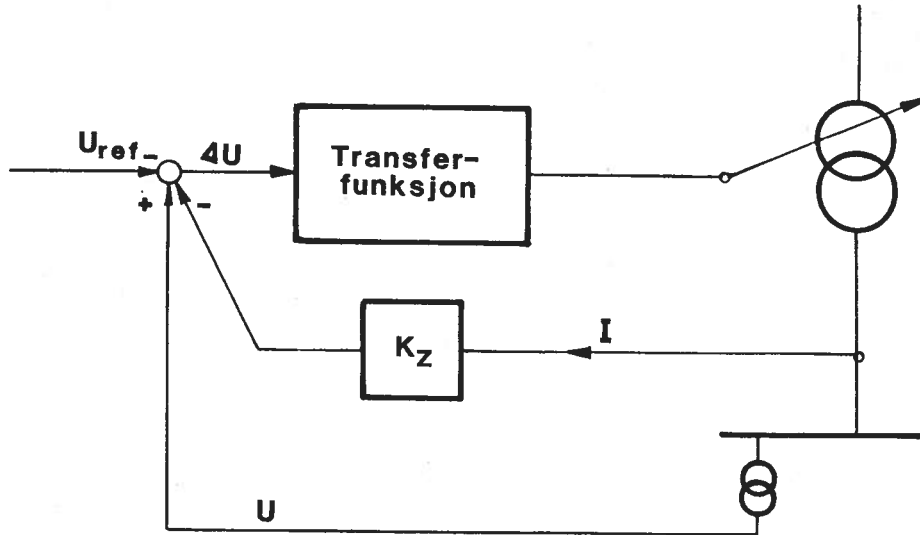


Fig. 1. Prinsippskisse for transformatorregulering.

Avvikssignalet til hovedsløyfen i regulatoren er gitt av

$$\Delta U = U - K_Z \cdot I - U_{ref} \quad (1)$$

U = matespenning [kV]

K_Z = kompounderingsgrad

I = laststrøm [A]

U_{ref} = referansespenning, regulerspenning [kV]

Med prosessen i stasjonær tilstand (dvs. $\Delta U = 0$)

blir

$$U = U_{ref} + K_Z \cdot I \quad (2)$$

dvs. at i perioder med stor last (stor I) heves matespenningen, mens den i lavlastperioder (liten I) senkes. Se fig. 4.

Parameteren K_z (kompoundingen) kan gis en viss fysikalsk tolkning med utgangspunkt i følgende figur

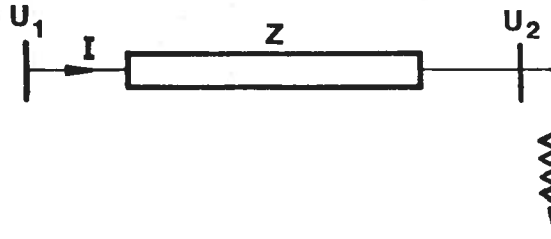


Fig. 2. Kompensering av spenningsfall på en enkel overføringslinje.

$$U_1 = U_2 + Z \cdot I \text{ (p.u.)} \quad (3)$$

Spenningsfallet kan v.h.j.a. projeksjonsmetoden skrives som

$$\Delta U = U_1 - U_2 = RI \cos\varphi + X \cdot I \sin\varphi$$

$$U_1 = U_2 + (R \cdot \cos\varphi + X \sin\varphi) \cdot I \quad (4)$$

Sammenlignes (2) og (4) sees at K_z er analogt med leddet $R \cos\varphi + X \sin\varphi$. Om lasten er rent ohmsk ($\cos\varphi = 1,0$, $\sin\varphi = 0$) kan R tolkes som resistansen fram til det stedet på en overføring hvor spenningen holdes konstant lik U_{ref} .

Om fasevinkelen φ er kjent og konstant, samt at R/X - forholdet for linja er kjent, kan stedet for konstant spenning beregnes med utgangspunkt i (4).

3 KRITERIER FOR REGULERING AV SPENNING I INNFØRINGSSTASJON

Det tas utgangspunkt i et forenklet høyspennings radialnett som vist i figuren nedenfor.

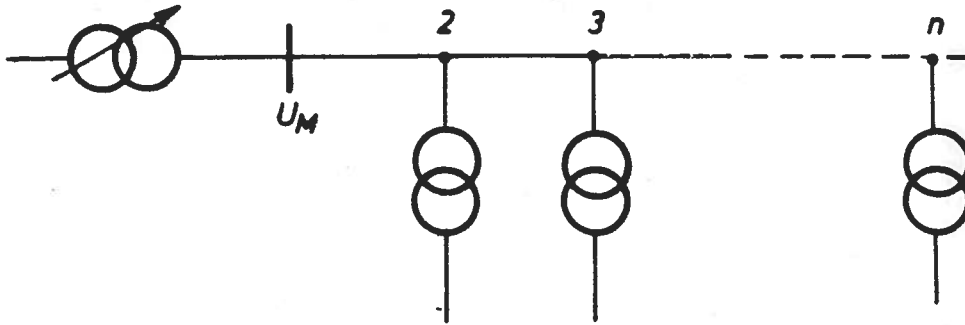


Fig. 3. Forenklet høyspennings radialnett med fordelingstransformatorer.

Fig. 4 illustrerer hvordan spenningen fordeler seg over fordelingstransformatorene i en tunglast- og en lettlastsituasjon:

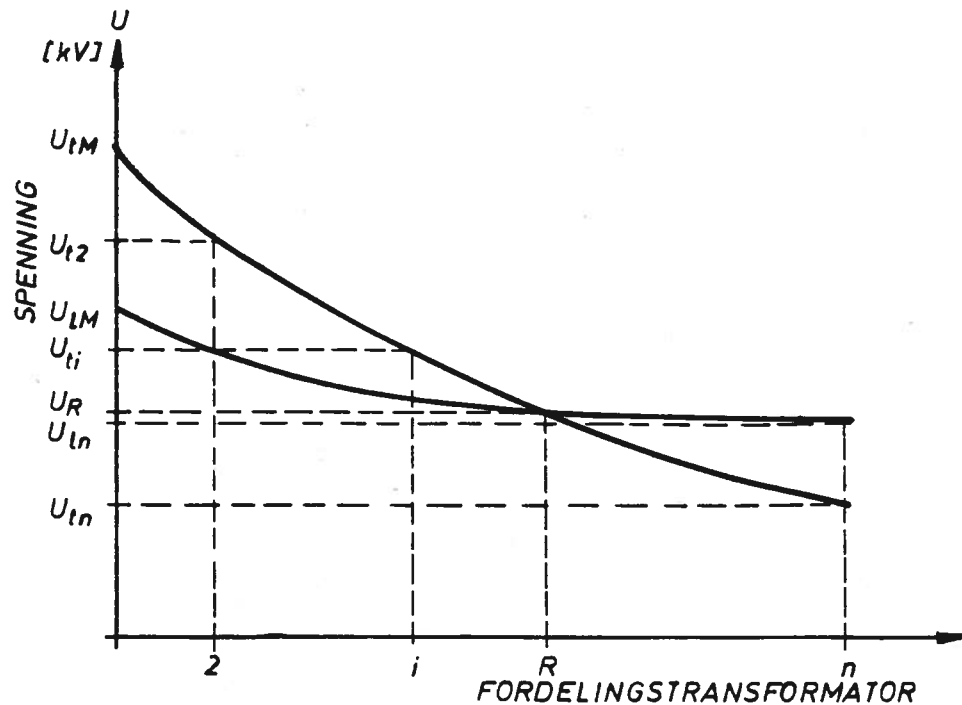


Fig. 4. Spenningsfall langs et høyspenningsradialnett i tung- og lettlast.

I figuren er (alle spenninger i kV):

- U_{tm} - matespenning i tunglast
- U_{lm} - " " lettlast
- U_{ti} - spenning i knutepunkt i , i tunglast
- U_{tn} - " ytterste knutepunkt (n) i tunglast
- U_{ln} - " " " i lettlast
- U_R - regulerspenning, referansespenning.

Regulerspenningen er den spenning det ønskes regulert ned til i matestasjonen i tomgang. Denne spenningen er sammen med komponderingen bestemmende for de langsomme spenningsvariasjonene i fordelingsnettene mellom tung- og lettlast.

Krav til spenningsnivå

Spenningene i høyspenningsnettene bør holdes så høy som mulig. Matespenningen må ikke overskride den maksimale spenning som er gitt av isolasjonsnivået:

$$U_m \leq U_{isol} \quad (5)$$

der

$$U_m = \text{matespenning}$$

$$U_{isol} = \text{maksimal spenning gitt av isolasjonsnivå}$$

U_{isol} vil normalt være den samme i hele nettet.

For å tilfredsstille leveringsbetingelsene på lavspenningssiden må spenningen ved hver fordelingstransformator holdes innenfor grensene gitt av

U_{max} - høyeste spenning som tillates på høyspenningssiden av fordelingstransformatoren uten at spenningen for første lavspenningsforbruker blir for høy.

U_{min} - laveste spenning som tillates på høyspenningssiden av fordelingstransformatoren uten at spenningen for lavspenningsforbrukeren ytterst på radialen blir for lav.

Dvs.:

$$\begin{aligned} U_i &\leq U_{\max} \\ U_i &\geq U_{\min} \end{aligned} \quad (6)$$

hvor U_i er spenningen på primærsiden av fordelingstransformator nr. i . Dette er forsøkt skissert i fig. 5:

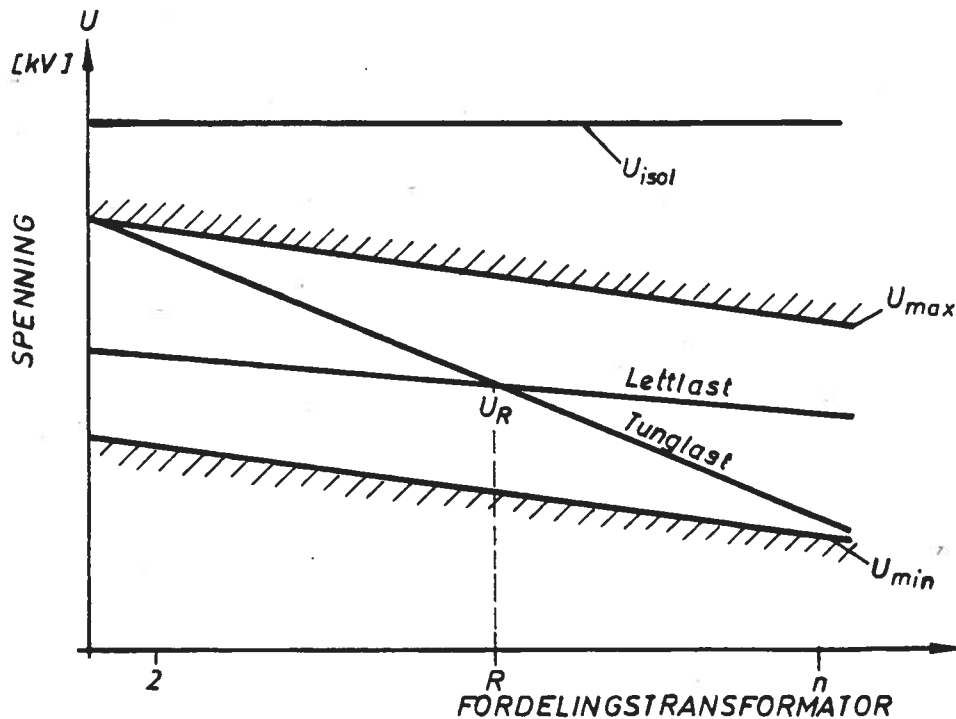


Fig. 5. Rammebetingelser for spenningsnivå ved hver fordelingstransformator.

Av figuren ses følgende:

- for knutepunkt nærmere matepunktet enn R er lettlastspenningen lavere enn tunglastspenningen
- for knutepunkt som ligger lengre ute på radialen enn R, er lettlastspenningen størst.

Regulerspenningen U_R må velges slik at tunglast- og lettlastprofilet ligger innenfor skrankene. Regulerspenningen holdes konstant ved punkt R over året eller reguleres dynamisk i stasjonen.

Dersom det er mange utgående radialer fra stasjonen, vil den laveste U_R være dimensjonerende.

Kriterium for optimalisering vil være å maksimalisere reguler-
spenningen U_R . I fordelingsnett kan spenningsfallet antas å være
lineært. Hvis grensene for det tillatte spenningsområdet også er
lineære og ikke stigende, kan U_R beregnes ut fra skjæringspunktet
mellom tunglast- og lettlastprofilen. Profilene beskrives ved en rett
linje mellom endepunktene:

tunglast: U_{tm} og U_{tn}

lettlast: U_{lm} og U_{ln}

4 BEREGNING AV REGULERSPENNING

I dette kapitlet skisseres ulike metoder for beregning av reguler-spenning. Den første metoden går ut på å minimalisere spenningsvariasjonene hos forbruker. I den andre metoden er det primære å redusere tapene ved å holde spenningen høyest mulig. Leveringsbetingelsene tas her vare på ved å definere rammebetingelser for spenningsvariasjoner.

4.1 MINIMAL SPENNINGSVARIASJON HOS FORBRUKER

Uten kompondering ville ytterste knutepunkt, nr. n , få en spenningsvariasjon mellom tunglast og tomgang lik differansen mellom U_{tm} og U_{tn} om det sees bort fra kapasitive ladestrømmer. (I tomgang blir da spenningen lik U_{tm} i hele nettet). I praksis oppstår ikke tomgang ved normal drift slik at dette estimatet for max. spenningsvariasjon i nettet uten kompondering er for pessimistisk. Ved å bruke kompondering kan spenningen holdes konstant et sted i nettet lik regulerspenningen (referanse spenningen) U_R (se fig. 4).

Dersom belastningene er like store, jevnt fordelt utover i nettet og samvarierende, vil den absolutte spenningsvariasjon mellom tunglast og lettlast bli lik i matepunktet og knutepunkt nr n ved å velge regulerspenningen lik

$$U_R = \frac{1}{2} (U_{tm} + U_{tn}) \quad [\text{kV}] \quad (7)$$

U_{tm} = spenning ved innmating i tunglast

U_{tn} = spenning ved ytterste knutepunkt i tunglast

Den maksimale spenningsvariasjon blir i så fall:

$$\Delta U_{\max} = \frac{1}{2} (U_{tm} - U_{tn}) \quad [\text{kV}] \quad (8)$$

Med en slik innstilling av spenningsområdet vil spenningen holdes konstant ved punkt R i nettet, uavhengig av belastningsvariasjoner.

Når det må tas hensyn til at belastningene ikke er jevnt fordelt utover i nettet og at belastningsstørrelsene varierer, kan reguler-
spenningen beregnes som et veid gjennomsnitt:

$$U_R = \frac{\sum_{i=1}^n (U_i \cdot P_i)}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad [\text{kV}] \quad (9)$$

Punktet R, hvor spenningen holdes konstant, blir liggende i be-
lastningstygdepunktet i høyspenningsnettet. Dette er illustrert i
fig. 6.

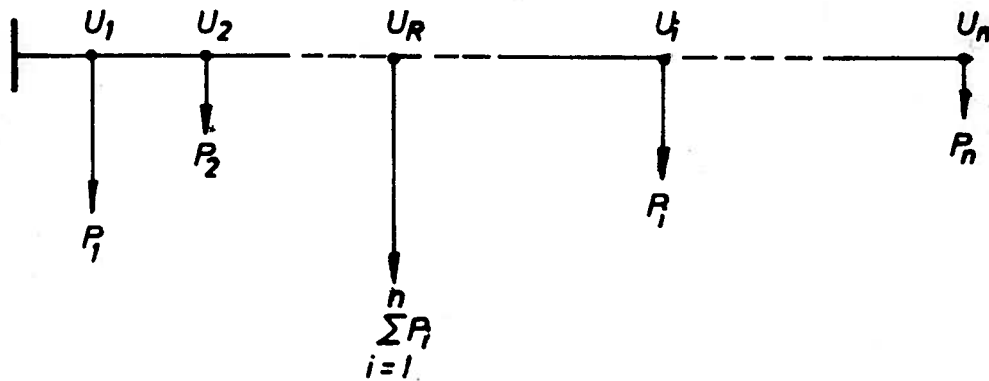


Fig. 6. Radialnett med belastningstygdepunkt ved spenning U_R

Eks:

Enkel radial med matesp. 22,5 kV og sum belastning 645,6 kW.

$$\begin{aligned} \text{gir } U_R &= \frac{21,99 \cdot 175,5 + 21,51 \cdot 243,5 + 21,44 \cdot 226,6}{645,6} \\ &= \underline{21,62 \text{ kV}} \end{aligned}$$

Det er spenningsvariasjonene hos forbruker som ønskes minimalisert, hvilket innebærer at spenningen bør holdes konstant i belastningens tyngdepunkt i lavspenningsnettet. Dette kan tas hensyn til ved å trekke inn det prosentuelle spenningsfall i fordelingstransformatorene og det maksimale spenningsfallet i lavspenningsnettet på følgende måte:

$$U_R = \frac{\sum_{i=1}^n (U_i \cdot P_i)}{\sum_{i=1}^n P_i} \left(1 - \frac{e_k}{100}\right) \left(1 - \frac{\Delta e_{\max}/2}{100}\right) \text{ [kV]} \quad (10)$$

e_k = gjennomsnittlig kortslutningsspenning i % for fordelingstransformatorene.

Δe_{\max} = maksimalt spenningsfall i lavspenningsnettet i%.

Eks:

Samme eksempel som ovenfor

$$e_k = 4,6\%$$

$$\Delta e_{\max} = 5\%$$

$$\begin{aligned} U_R &= 21,62 \left(1 - \frac{4,6}{100}\right) \left(1 - \frac{5/2}{100}\right) \\ &= \underline{20,11 \text{ kV}} \end{aligned}$$

Innstilling av omsetningsforhold for fordelingstransformatorene

Det kan kompenseres for spenningsfallet i høyspenningsnettet ved å justere omsetningsforholdet trinnvis i fordelingstransformatorene. Standard fordelingstransformatorer kan koples trinnvis i området $U_p \pm 2 \times 2,5\% / 240$ der U_p er påstemplet høyspenning.

Kriteriet for valg av trinnstilling i et vilkårlig knutepunkt er å finne den innstilling som gir en spesifisert spenning på transformatorens lavspenningsside når spenningen på høyspenningssiden er gitt.

Dersom kravet er at forbrukerne skal sikres tilnærmet samme spenningsnivå, kan spenningen på fordelingstransformatorens høyspenningsside settes lik middelverdien av knutepunktets spenning i tung- og lettlast:

$$U_{mi} = \frac{1}{2} (U_{ti} + U_{li}) \quad [\text{kV}] \quad (19)$$

4.2 MINIMALISERING AV TAP

Metoden går ut på å bestemme hvor i nettet spenningen skal holdes stiv ved å beregne optimal impedans fra innmating til punktet R. Størrelsen på denne impedansen bestemmer innstilling av kompondering for transformatoren i innføringsstasjonen.

4.2.1 Optimal regulering ved lineært spenningsfall

Spenningsprofilen beskrives ved en rett linje mellom endepunktene:

$$\begin{aligned}U_R &= U_{t1} - \frac{(U_{t1} - U_{tn})}{R} \cdot r \\ &= U_{l1} - \frac{(U_{l1} - U_{ln})}{R} \cdot r\end{aligned}\tag{11}$$

Her er

U_{t1} = spenning ved matepunktet i tunglast

U_{tn} = spenning ved ytterste knutepunkt i tunglast

U_{l1} = spenning ved matepunkt i lettlast

U_{ln} = spenning ved ytterste knutepunkt i lettlast

R = total resistans fra innmating til ytterste knutepunkt på radialen

r = resistans fra innmating til punktet hvor spenningen skal holdes stiv

n = knutepunkt med lavest spenning, dvs. ytterst på radialen.

(11) løses mhp. r:

$$r = \frac{U_{t1} - U_{11}}{\left(\frac{U_{t1} - U_{tn} - U_{11} + U_{1n}}{R}\right)} \quad (12)$$

$$= \frac{\Delta U_1}{\Delta U_1 - \Delta U_n} \cdot R$$

Her er

ΔU_1 = Spenningsvariasjon mellom tung- og lettlast ved innmating
 ΔU_n = " " " " " " ved ytterste knutepunkt.

I likningene (11) og (12) inngår endepunktene for hhv. tunglast- og lettlastprofilen. Disse finnes ved å utføre lastflytberegninger for en typisk tunglast- og lettlastsituasjon.

Det gjenstår å optimalisere regulerspenningen uttrykt ved likn. (11). Tapene reduseres ved å holde spenningen så høy som mulig langs radialen. Det gir følgende optimaliseringsbetingelser:

$$\begin{aligned} \text{Tunglast: } U_{t1}' &= U_{1,max} \\ \text{Lettlast: } U_{1n}' &= U_{n,max} \end{aligned} \quad (13)$$

I (13) er $U_{1,max}$ den maksimalt tillatte spenning ved innmating gitt av isolasjonsnivå. $U_{n,max}$ som er den maksimalt tillatte spenning på høyspenningssiden av fordelingstransformatoren ved ytterste knutepunkt, er gitt av spenningsforholdene på lavspenningssiden i lettlast.

De andre spenningene som inngår i (11) og (12) kan uttrykkes ved (13):

$$\begin{aligned} \text{Tunglast: } U_{tn}' &= U_{1,\max} - \Delta U_t \\ \text{Lettlast: } U_{l1}' &= U_{n,\max} + \Delta U_l \end{aligned} \quad (14)$$

Her er

ΔU_t = totalt spenningsfall langs radialen i tunglast [kV]

ΔU_l = totalt spenningsfall langs radialen i lettlast [kV].

(13) og (14) innsettes i uttrykket for resistansen (12):

$$\begin{aligned} r &= \frac{U_{1,\max} - (U_{n,\max} + \Delta U_l)}{U_{1,\max} - (U_{1,\max} - \Delta U_t) - (U_{n,\max} + \Delta U_l) + U_{n,\max}} \cdot R \\ &= \frac{U_{1,\max} - U_{n,\max} - \Delta U_l}{\Delta U_t - \Delta U_l} \cdot R \end{aligned} \quad (15)$$

Optimal regulerspenning ved lineært spenningsfall finnes ved å sette (15) inn i (11).

$$\begin{aligned} U_R &= U_{1,\max} - \frac{(U_{1,\max} - (U_{1,\max} - \Delta U_t))}{R} \left(\frac{U_{1,\max} - U_{n,\max} - \Delta U_l}{\Delta U_t - \Delta U_l} \right) \cdot R \\ &= \frac{U_{1,\max} - (U_{1,\max} - U_{n,\max} - \Delta U_l) \frac{\Delta U_t}{\Delta U_t - \Delta U_l}}{\quad} \quad (16) \end{aligned}$$

Eks:

$$U_{1,max} = 22,6 \text{ kV}$$

$$U_{n,max} = 21,0 \text{ kV}$$

$$\Delta U_t = 1,575 \text{ kV}$$

$$\Delta U_l = 0,675 \text{ kV}$$

$$U_R = 22,6 - (22,6 - 21,0 - 0,675) \frac{1,575}{1,575 - 0,675}$$

$$= 20,98 \text{ kV}$$

4.2.2 Optimal regulering ved ikke-lineært spenningsfall

Tung- og lettlastprofilene ved ikke-lineært spenningsfall er skissert i figuren nedenfor.

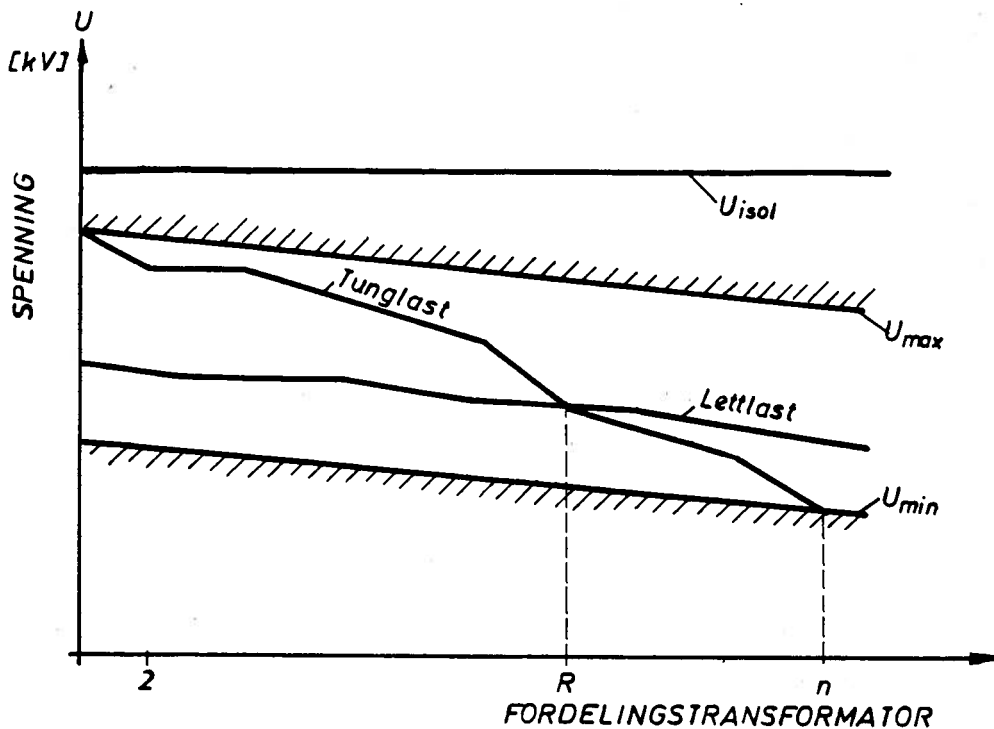


Fig. 7. Tunglast- og lettlastprofil ved ikke-lineært spenningsfall.

Når spenningsfallet langs radialen ikke er lineært, er det nødvendig å kjenne spenningene i alle knutepunkt i tunglast og lettlast for å beregne regulerspenningen og optimalpunktet for kompondering.

Optimalt profil blir nå:

$$\begin{aligned}
 \text{Tunglast: } U_{t1}' &= U_{1,\max} \\
 U_{ti}' &= U_{1,\max} - \Delta U_{ti} \quad i = 2, 3, \dots, n \\
 \\
 \text{Lettlast: } U_{ln}' &= U_{n,\max} \\
 U_{li}' &= U_{n,\max} + \Delta U_{li} \quad i = n, n-1, \dots, 1
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

$U_{1,\max}$ og $U_{n,\max}$ er de samme som i kapitlet foran.

ΔU_{ti} er spenningsfall fra matepunkt til knutepunkt i , i tunglast

ΔU_{li} er spenningsdifferansen fra ytterste knutepunkt til knutepunkt i , i lettlast.

Optimalpunktet for kompondering blir fortsatt der profilene krysser hverandre (se fig. 7), dvs. når

$$U_{ti}' \leq U_{li}' \quad i = 1, 2, \dots, n
 \tag{18}$$

Dersom alle spenningene måles på lavspenningssiden av fordelingstransformatorene, gjelder metoden også om lavspenningsnett er med i beregningen.

4.2.3 Algoritme for beregning av optimal kompondering for transformator i innføringsstasjon og optimal innstilling av omsetningsforhold for fordelingstransformatorene

Det er utarbeidet en algoritme som kan tilpasses et generelt lastflytprogram for radialnett, for metodene skissert i kap. 4.2.

Algoritmen tar hensyn til at spenningsfallet kan være ikke-lineært og beregner spenningsprofil med og uten lavspenningsnett.

Nødvendige inngangsdata:

Nett-topologi og impedanser.

Spenningsfall langs radialen i tunglast og lettlast.

Omsetningsforhold for fordelingstransformatorer.

Maks. og min. spenninger i lavspenningsnett.

Maks. spenning i høyspenningsnett.

Dersom lavspenningsnett ikke er med i beregningene, er det nødvendig å kjenne maks. spenningsfall i lavspenningsnett med angivelse av fordelingstransformator.

Figur 8 viser eksempel på høy- og lavspenningsprofil i tung- og lettlast. Det ses av figuren at de to spenningsprofilene kan gi ulik kompondering.

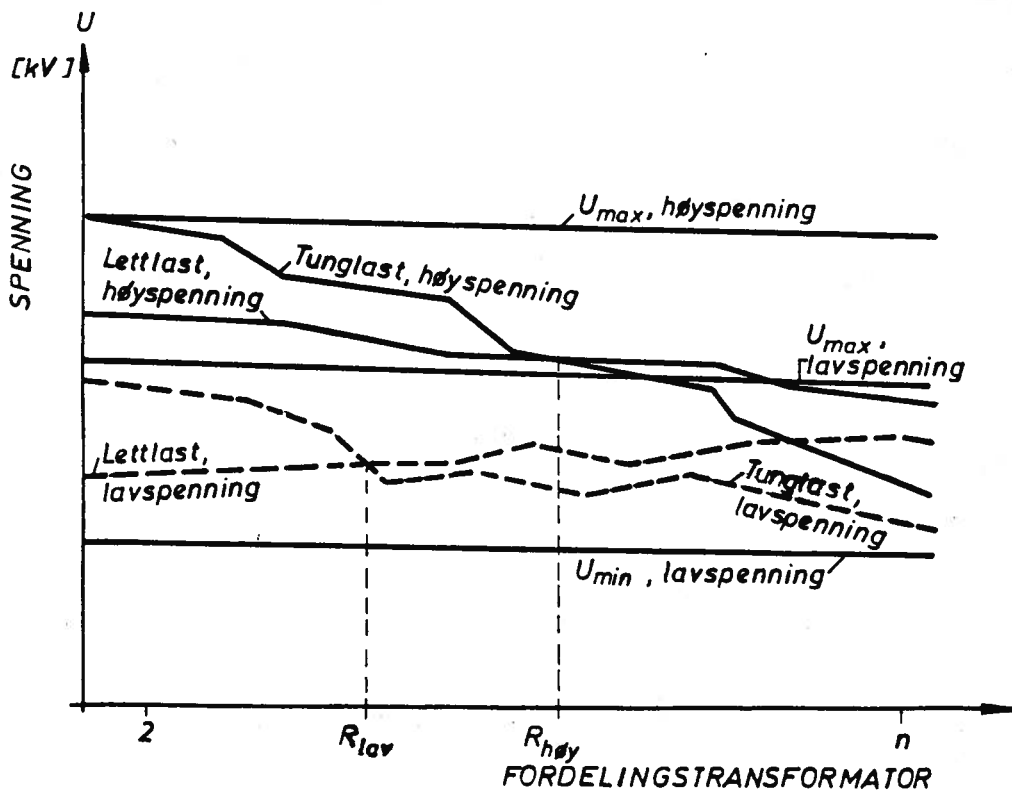


Fig. 8. Eksempel på høy- og lavspenningsprofil i tung- og lettlast.

Den største del av tapene i fordelingsnettene opptrer i lavspenningsnettene. Det er mest å vinne på å holde høy spenning der, og det antas at alle fordelingsstransformatorer i utgangspunktet står i den stilling som gir høyeste spenning på lavspenningsiden.

Algoritme:

1. Beregn tunglast- og lettlastspenninger for alle fordelingsstransformatorer og ytterste knutepunkt i lavspenningsnettene. Finn dimensjonerende radial dersom det er flere utgående radialer.

2. Bestem maksimal matespenning i tunglast som
i) maks. tillatt spenning i høyspenningsnettene.

eller

ii) maks. tillatt spenning i lavspenningsnettene for første fordelingsstransformator når denne står i laveste stilling (som gir minimum sekundærspenning i tunglast).

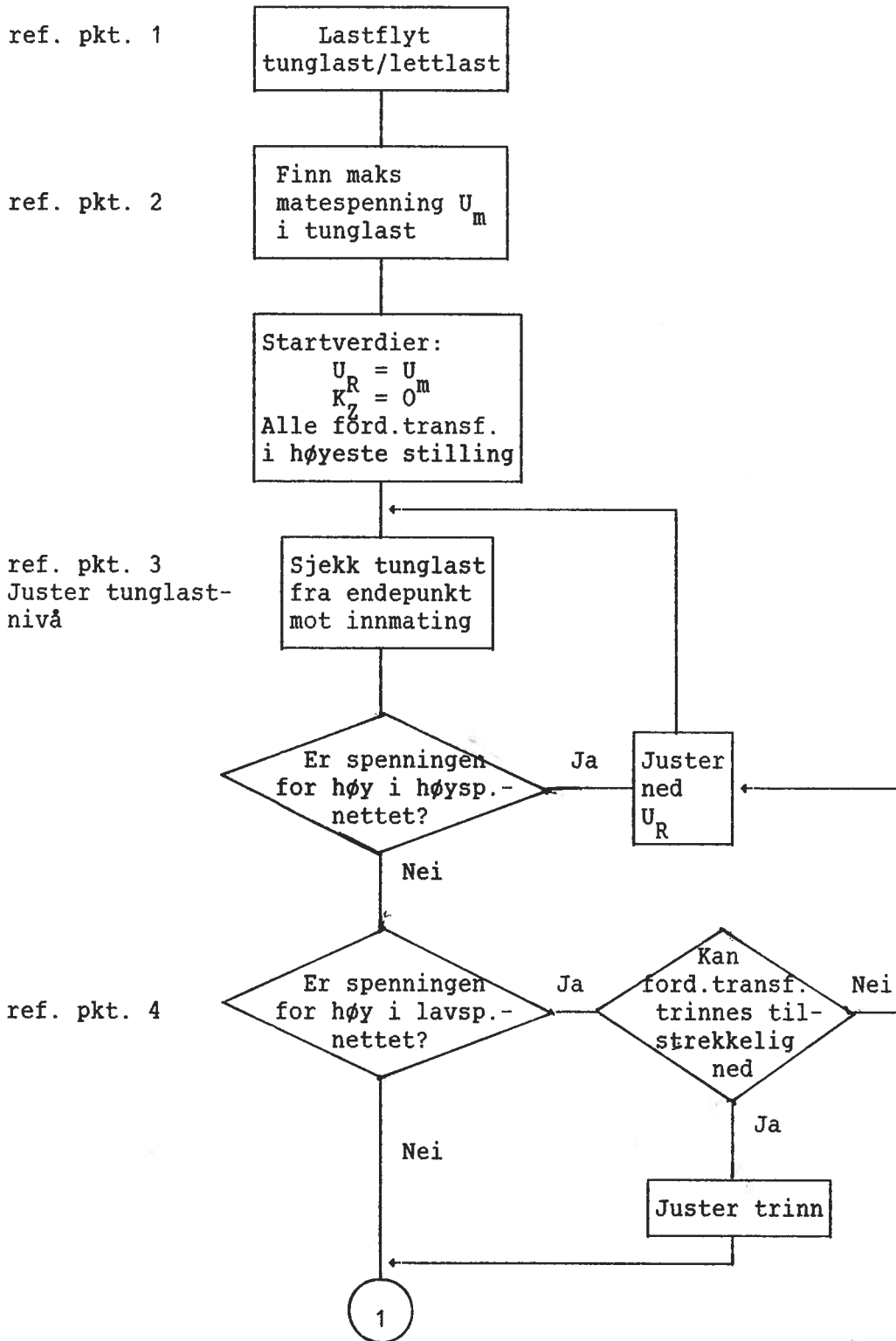
3. Gå fra endepunktet på radialen til matepunktet med fiksert spenning og sjekk om kravene er oppfylt.

4. Hvis kravene ikke er oppfylt for et knutepunkt, juster reguleringspenning eller kompondering, evt. endre omsetningsforhold på den fordelingsstransformatoren hvor grensen overskrides.

5. Er kravene fortsatt ikke oppfylt, gå til punkt 3. Ellers avslutt prosedyren.

Algoritmen er skissert i fig. 9.

Algoritme:



forts.

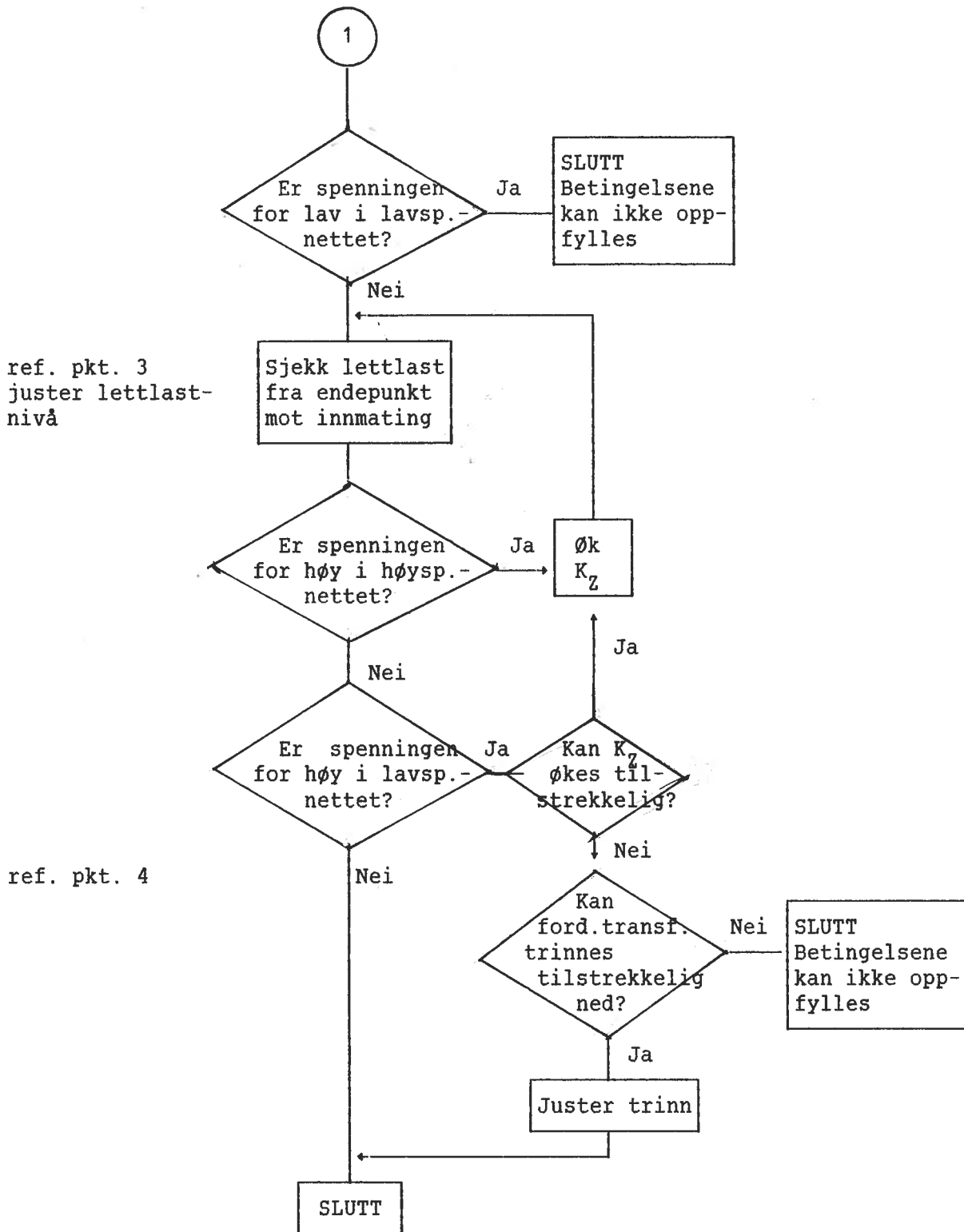


Fig. 9. Algoritme for beregning av optimal kompondering for transformator i innføringsstasjon og optimal innstilling av omsetningsforhold for fordelingstransformatorene.

5 BEREGNING AV ENERGIGEVINST

Spenningsregulering i innføringsstasjonen kombinert med optimal innstilling av omsetningsforhold på fordelingstransformatorene forventes å gi en årlig energigevinst som følge av reduserte tap i nettet.

Her skisseres kort hvordan tapsreduksjonen i nettet kan beregnes.

Tapene i en seksjon:

$$P_{\text{tap},i} = \frac{R_i}{U_{Li}^2} (P_i^2 + Q_i^2) \cdot 0,001 \quad [\text{kW}] \quad (20)$$

R_i = Seksjonens resistans [Ω]

U_{Li} = Spenning i seksjonens lastpunkt [kV]

P_i = Aktiv effekt som flyter i seksjonen [kW]

Q_i = Reaktiv effekt som flyter i seksjonen [kvar]

Totale tap i nettet finnes ved å summere over alle seksjoner.

$$P_{\text{tap}} = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{U_{Li}^2} (P_i^2 + Q_i^2) \cdot 0,001 \quad [\text{kW}] \quad (21)$$

n = antall seksjoner

Energitalp i en seksjon:

$$\begin{aligned} W_{\text{tap},i} &= \int_{t=0}^{8760} P_{\text{tap},i} dt \\ &= \int_{t=0}^{8760} \frac{R_i}{U_{Li}^2} (P_i^2 + Q_i^2) \cdot 0,001 dt \\ &= \frac{P_{\text{max},i}}{T_b} \cdot T_b \quad [\text{kWh/år}] \quad (22) \end{aligned}$$

T_b - brukstid for tap [h]

$P_{\text{max},i}$ - maks effekt i seksjon i [kW]

Ved å negligjere endring i P_i og Q_i som følge av spenningsendring kan tapene skrives

$$W_{\text{tap},i} = \frac{k}{U^2}$$

$k = \text{konstant}$

En gjennomsnittlig spenningsheving på 2,5% for fordelingstransformatorene gir

$$W'_{\text{tap},i} = \frac{k}{(1,025 \cdot U)^2} \approx \frac{k}{1,05 \cdot U^2}$$

Det gir en gjennomsnittlig reduksjon i energitapene på

$$\Delta W_i = \frac{k}{U^2} \left(\frac{1}{1,0} - \frac{1}{1,05} \right) = \frac{k}{U^2} 0,05 \text{ dvs. } \underline{5\%}$$

Verdi av årlig innspart energi i seksjonen:

$$K_{w,i} = k_w \cdot \Delta W_i = k_w (W_{\text{tap},i} - W'_{\text{tap},i}) \quad [\text{kr}/\text{år}] \quad (23)$$

$$W'_{\text{tap},i} = \text{energitap i seksjon nr. i etter spenningsheving}$$

$$k_w = \text{tapspris, energi} \quad [\text{kr}/\text{kWh}, \text{år}]$$

I tillegg kommer verdi av årlige reduserte effekttap.

SINTEF Energiforskning AS
Adresse: 7465 Trondheim
Telefon: 73 59 72 00

SINTEF Energy Research
Address: NO 7465 Trondheim
Phone: + 47 73 59 72 00