

RA 638

December 2022

TEGRA-modellen –

Forstærkning

Dokumentation af forstærkningsmetodik anvendt i
TEGRA

Rapporten er udarbejdet af:	Can Karatas	Green Power Denmark
	Jasmin Mehmedalic	Green Power Denmark
	Jonas B. B. Hansen	Green Power Denmark

Netteknisk rapport:	RA638
Klasse:	1
Rekvirent:	Netudvalget og Teknikudvalget
Dato for udgivelse:	1. december 2022
Sag:	7525

VERSIONSLOG

Version / Dato	Opdatering	Initialer
V1.0 / 2022-12-01	Første udgivelse.	CKA JBH JME

RESUME

Rapporten har til formål at dokumentere den del af TEGRA-modellen, hvor netforstærkning beregnes.

Kapitel 1 giver et kort overblik over TEGRA og tilhørende dokumentation, samt de forudsætninger, der skal være opfyldt, for at netforstærkning kan beregnes.

Kapitel 2 giver en opsummering af de input, som kommer fra netanalysen, og som er en forudsætning for, at netforstærkning kan beregnes.

I kapitel 3 gives en gennemgang af, hvordan netforstærkning beregnes på baggrund af netanalysen.

Kapitel 4 gennemgår de dimensioneringskriterier, der bruges, når det skal vurderes, om et net er overbelastet og skal forstærkes. Disse værdier bruges også til at vurdere, hvornår et net er tilstrækkeligt forstærket.

I kapitel 5 gives en kort forklaring af den kalibrering, der er foretaget af både forstærkningsalgoritmen og dimensioneringskriterierne for at sikre, at resultaterne af netforstærkningen er korrekte og nøjagtige.

Kapitel 6 opsummerer de resultater, som fremkommer efter netforstærkning, og som danner basis for den efterfølgende skalering til landsplan.

INDHOLDSFORTEGNELSE

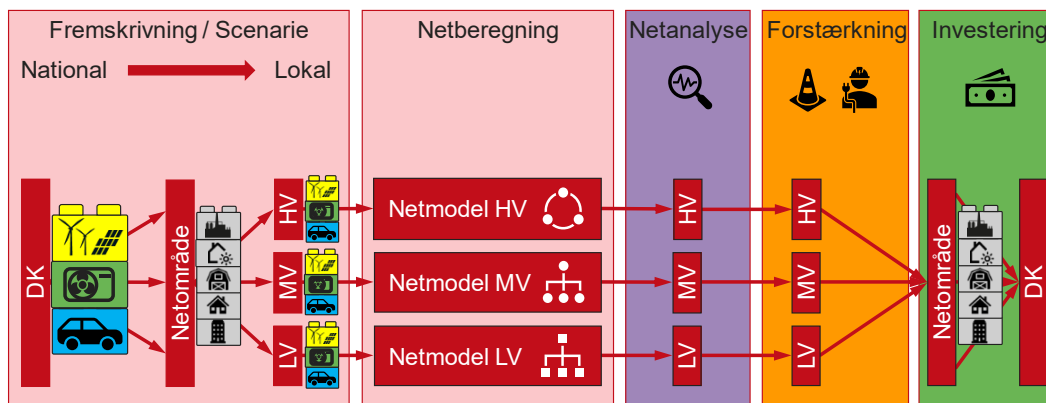
Versionslog	5
Resume	6
Indholdsfortegnelse	7
1. Indledning	8
1.1. <i>Oversigt over TEGRA-modellen</i>	8
1.2. <i>Oversigt over TEGRA-dokumentation</i>	8
1.3. <i>Forudsætninger for denne rapport</i>	8
2. Kort om netanalyse	9
3. Forstærkning af elnettet	10
3.1. <i>Generelt om forstærkningsalgoritmen</i>	10
3.2. <i>Regelbaseret forstærkning af lav- og mellemspændingsnet</i>	10
3.3. <i>Analysebaseret forstærkning af højspændingsnet</i>	15
4. Dimensioneringskriterier	18
4.1. <i>Dimensioneringskriterier for lavspændingsnet</i>	19
4.2. <i>Dimensioneringskriterier for mellemspændingsnet</i>	20
4.3. <i>Dimensioneringskriterier for højspændingsnet</i>	23
5. Kalibrering	24
5.1. <i>Kalibrering af forstærkning i lav- og mellemspændingsnet</i>	24
5.2. <i>Kalibrering af forstærkning i højspændingsnet</i>	26
6. Resultater	27
6.1. <i>Resultater for lav- og mellemspændingsnet</i>	27
6.2. <i>Resultater for højspændingsnet</i>	28
APPENDIKS 1. Dimensioneringskriterier	29
APPENDIKS 2. Oversigt over komponentkategorier	30

1. INDLEDNING

Denne rapport er en del af en serie, der dokumenterer TEGRA-modellens opbygning og anvendelse.

1.1. OVERSIGT OVER TEGRA-MODELLEN

Figur 1.1 viser de overordnede processer i TEGRA-modellen.



Figur 1.1 TEGRA – overblikdiagram.

1.2. OVERSIGT OVER TEGRA-DOKUMENTATION

RA635	TEGRA-modellen - Introduktion
RA619	Definition af netområder og arketyper i distributionsnettet
RA620	Analyseforudsætninger for distributionsnettet DEL 1: Metodebeskrivelse for fordeling af elbiler, varmepumper og solcelleanlæg på netområder
RA623	Analyseforudsætninger for distributionsnettet DEL 2: Simuleringsprofiler
RA636	TEGRA-modellen – Netberegninger
RA637	TEGRA-modellen – Netanalyse
RA638	TEGRA-modellen – Forstærkning
RA639	TEGRA-modellen – Skalering
RA640	TEGRA-modellen – Merinvesteringer

Tabel 1.1 Oversigt over TEGRA-dokumentation.

1.3. FORUDSÆTNINGER FOR DENNE RAPPORT

Forstærkningsberegningerne beskrevet i denne rapport forudsætter, at der er udført netanalyse og defineret dimensioneringskriterier for net og komponenter.

2. KORT OM NETANALYSE

I netanalysen identificeres det, hvilke elnet der har behov for forstærkning. Dette gøres ved, at elnettene vurderes både på komponentniveau og på netniveau ift. fastsatte dimensioneringskriterier. På komponentniveau undersøges hver enkelt komponent i et elnet ift. dens maksimale kapacitet. På netniveau undersøges en række parametre, som ikke kan undersøges på komponentniveau, fx spændingsfald og -stigning.

Resultaterne fra både komponentniveau og netniveau er nødvendige for at kunne beregne forstærkningsbehovet i elnettene. Netanalysen giver detaljerede resultater for hvert enkelt net i modellen.

Netanalysen er nærmere beskrevet i RA637.

3. FORSTÆRKNING AF ELNETTET

Forstærkning af elnettet er baseret på en lang række regler, vurderinger og ren og skær erfaring. Og selvom de mange regler og vurderinger er med til at gøre processen mere overskuelig og struktureret, vil det altid være op til det enkelte netselskab og den enkelte netplanlægger, hvordan og hvornår disse regelsæt kan bruges, og hvornår det er hensigtsmæssigt at fravige dem.

I modellen er hele processen omkring netforstærkning automatiseret i en computeralgoritme. Denne forstærkningsalgoritme er en kraftig simplificering og generalisering af de regler og vurderinger, som anvendes af netplanlæggere i netselskaberne.

Forstærkningsalgoritmen er designet og kalibreret til at give et retvisende forstærkningsbehov inden for hver arketype, men kan ikke bruges til at bestemme, hvordan et specifikt lokalt net skal forstærkes. Kalibreringen af forstærkningsalgoritmen kan ikke ses separat fra fastsættelsen af dimensioneringskriterier, da de to dele af modellen har et meget tæt samspil med hinanden.

I det følgende gives en beskrivelse af, hvordan forstærkningsalgoritmen udregner forstærkning af elnettet og kommer frem til et forstærkningsbehov for hver arketype.

3.1. GENERELT OM FORSTÆRKNINGSALGORITMEN

Forstærkningsalgoritmen kan deles i to separate dele – en regelbaseret del, som benyttes på lav- og mellemspændingsnet, og en markant simple analysebaseret del, som bruges til højspændingsnet. De to algoritmer er kalibreret individuelt, men også "krydskalibreret", så de tilsammen giver den korrekte mængde forstærkning.

3.2. REGELBASERET FORSTÆRKNING AF LAV- OG MELLEMSPÆNDINGSNET

Den regelbaseret forstærkning af lav- og mellemspændingsnet er baseret på analyser af strøm og spænding. Efter at forbrug og produktion er blevet fordelt i de lokale net, udføres der loadflowberegninger. Resultaterne af loadflowberegninger giver bl.a. strømmen og belastningen af hver komponent og spændingen i alle punkter i de elnet, der regnes på.

Der netforstærkes baseret på:

- Belastning af transformere
- Belastning af kabler
- Spændingsfald og spændingsstigning på radialer/udføringer.

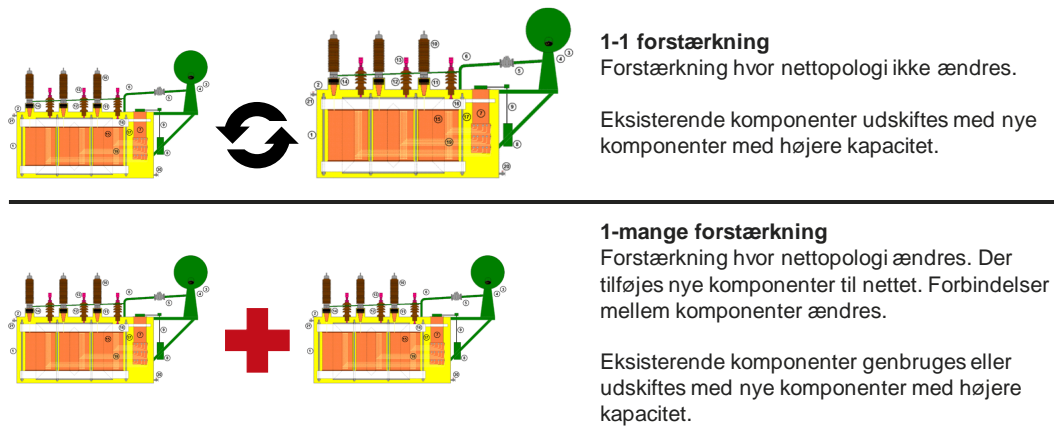
Udgangspunktet for alle netforstærkninger er en radial netstruktur, som udelukkende analyseres i normaldrift. På baggrund af belastning og spænding laves der tre typer af netforstærkning:

- 1) Transformerverforstærkning
- 2) Strømförstærkning af kabler
- 3) Spændingsforstærkning af kabler.

Disse tre typer netforstærkning laves i den nævnte rækkefølge. Der startes med transformerverforstærkning, fordi det skal sikres, at der er tilstrækkelig kapacitet af transformere til at forsyne forbrug og produktion. Herefter sikres gennem strømförstærkning af kabler, at der også er tilstrækkelig kapacitet i kablerne til at forsyne forbrug og produktion. Til sidst sikres det gennem spændingsforstærkning af kabler, at dimensioneringskriterierne for spænding også er overholdt. Et diagram af processen er vist i figur 3.2.

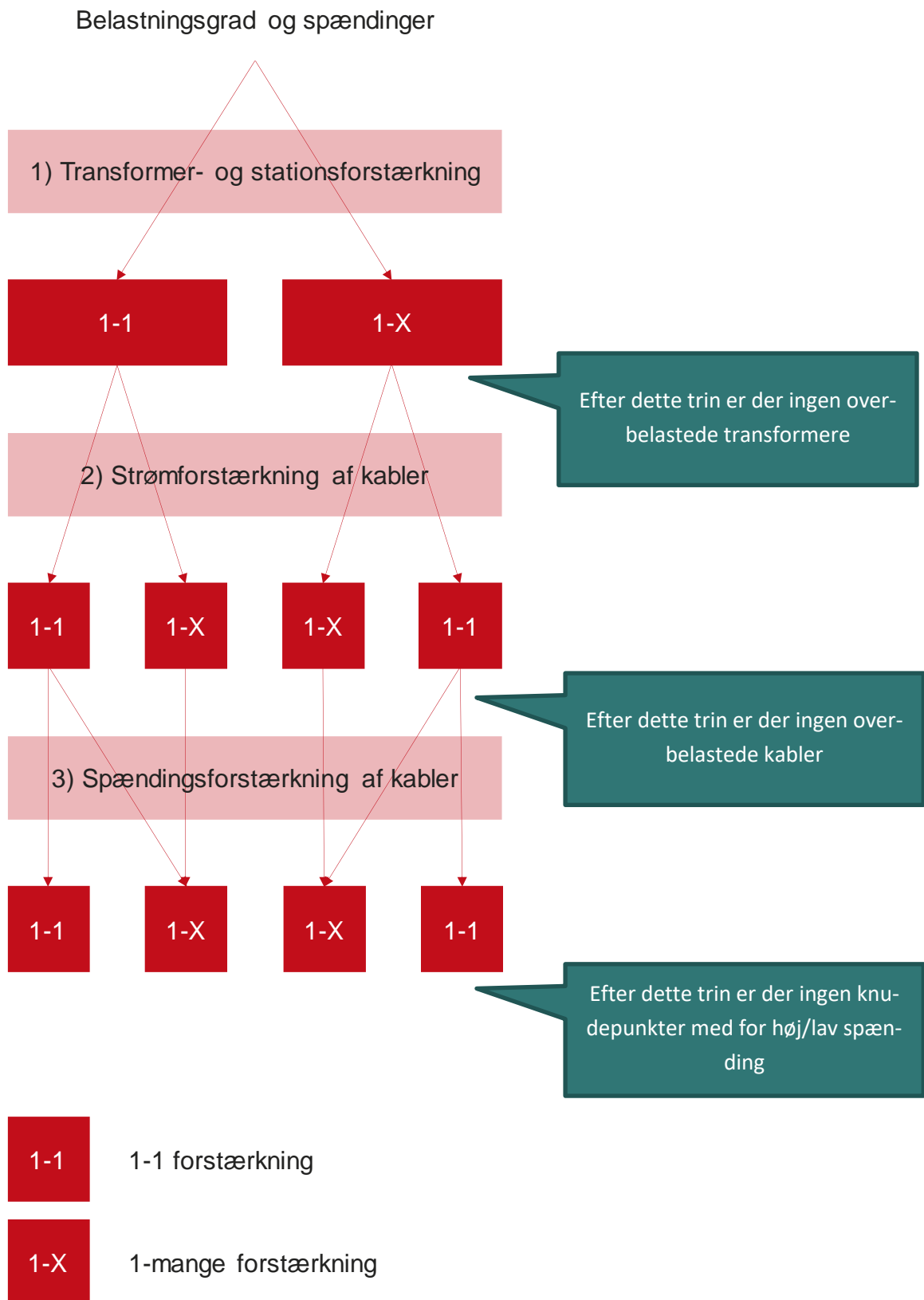
3.2.1. 1-1-forstærkning og 1-mange-forstærkning

I hvert trin i processen skal der vælges mellem to grundlæggende måder, hvorpå elnet kan netforstærkes – 1-1-forstærkning (komponentforstærkning) og 1-mange-forstærkning (forstærkning ved nybyg). Definitionen af disse to former for forstærkning er givet i figur 3.1.



Figur 3.1 Definition af 1-1-forstærkning og 1-mange-forstærkning.

Komponenter kan ikke vokse uendeligt i størrelse, og når stigningen i forbrug eller produktion bliver tilpas stor, vil det altid være nødvendigt at foretage 1-mange-forstærkning, hvor nye komponenter tilføjes til elnettet og nettopologien ændres.



Figur 3.2 Beslutningstræ, der viser sekvensen af de tre typer af forstærkning.

3.2.2. Transformerforstærkning

Transformere forstærkes udelukkende på baggrund af deres belastningsgrad. Hvis transformerens belastning overstiger grænseværdien i dimensioneringskriteriet, skal den forstærkes. Forstærkning udføres enten som komponentforstærkning af den eksisterende transformer (1-1-forstærkning) eller ved at tilføje flere transformere (1-mange-forstærkning). Der benyttes altid 1-1-forstærkning, hvis dette er tilstrækkeligt til at dække effektbehovet.

3.2.3. Strøm- og spændingsforstærkning af kabler

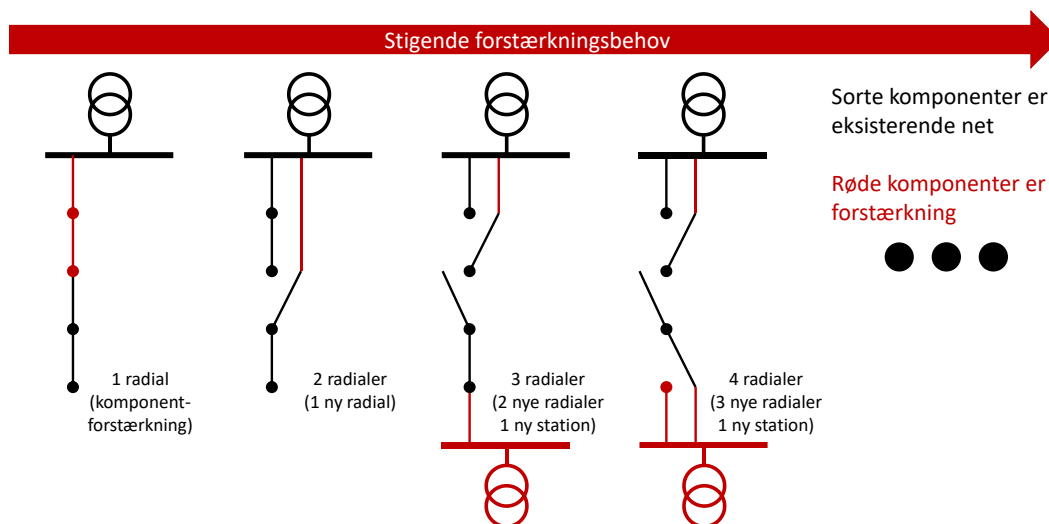
Kabler forstærkes på baggrund af både belastning og spænding. Forstærkningen sker i to trin:

- 1) Strømförstærkning (sikrer, at kablet aldrig er belastet højere end dimensioneringskriteriet).
- 2) Spændingsforstærkning (sikrer, at spændingen i alle punkter i elnettet ligger inden for dimensioneringskriterierne).

Når kabler skal forstærkes, evalueres hvert kabel både individuelt og som en samlet del af en udföring/radial. Den individuelle vurdering sikrer, at hvert kabel bliver forstærket på baggrund af den belastning, det specifikke kabel oplever. Den samlede vurdering sikrer, at det er de rigtige kabler, der forstærkes i forbindelse med spændingsforstærkning, og at kablerne samlet set forstærkes efter en fastsat procedure (se figur 3.3).

Forstærkning af kabler er relativt simpel, så længe det kan klares ved 1-1-forstærkning, hvor et kabel udskiftes med et med højere kapacitet. Ved større stigninger i forbrug og produktion, vil det dog hurtigt blive nødvendigt med 1-mange-forstærkning, hvor der tilføjes nye kabler og nettopologien ændres. Dette kan gøres på mange måder – valget vil hovedsageligt afhænge af den primære hensigt. I praksis benyttes der i Danmark en række metoder, som har til formål at genbruge det eksisterende elnet i videst muligt omfang og derved opnå den største forbedring af elnettets kapacitet med den laveste omkostning. Dette betyder blandt andet, at der ikke bare lægges kabler parallelt med de eksisterende kabler, men at topologien af det lokale elnet ændres på anden vis.

Når forstærkningsalgoritmen skal udregne 1-mange-forstærkning af kabler, er det baseret på en metodik, hvor der laves nye stationer. Dette giver en helt særlig måde at udbygge det lokale elnet på, som er illustreret i figur 3.3.



Figur 3.3 Illustration af hvordan lokale lav- og mellemspændingsnet udbygges med nye kabler og stationer ved forskellige forstærkningsbehov.

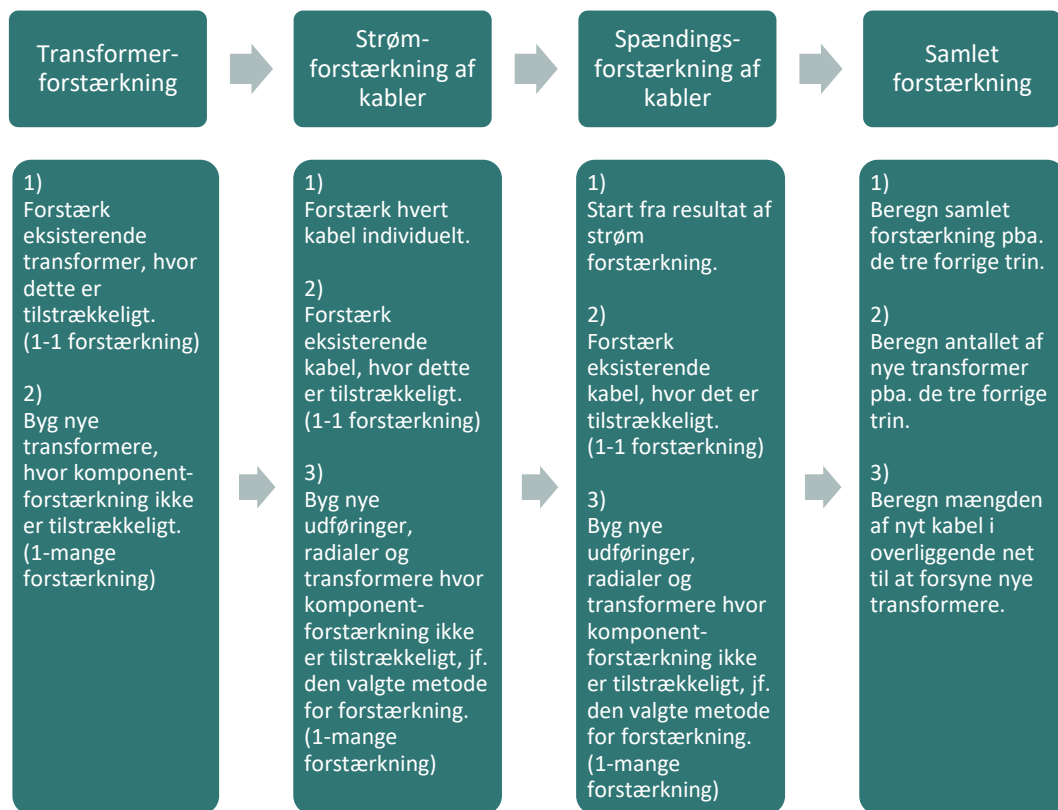
Som det er illustreret på figur 3.3, vil man ved mindre forstærkningsbehov oftest kunne nøjes med at forstærke enkelte kabler, men som forstærkningsbehovet stiger, fordeles kunderne på flere radialer. Denne form for udbygning har flere fordele. Den giver mulighed for at genbruge store dele af det eksisterende elnet, hvilket er vigtigt, fordi komponenterne har meget lange levetider, og de helst ikke skal skiftes, før de har udtjent deres levetid. Det har også den fordel, at det, samtidig med at kapaciteten øges, giver en større forbedring af spændingen, end mange andre former for udbygning. Derudover tillader denne form for udbygning i højere grad end mange andre former, at udbygningen kan gennemføres i stadier. Således er det ikke nødvendigt at bygge det hele fra dag et, men der kan bygges i stadier, efterhånden som behovet stiger. Dermed kan risikoen for fejlinvesteringer minimeres, hvis forbrug og produktion ikke udvikler sig som forventet.

3.2.4. Samlet forstærkning

Da der under strøm- og spændingsforstærkning af kabler bygges nye stationer, er det også nødvendigt af vurdere, hvad dette har af betydning for transformerforstærkning og for det overliggende spændingsniveau. Hver gang der bygges en ny station, indebærer det en ny transformer. Samtidig skal den nye station forsynes fra det overliggende spændingsniveau, hvilket betyder, at der skal lægges nye kabler på det overliggende spændingsniveau.

Som den sidste del af processen med forstærkning af kabler korrigeres transformerforstærkningen, og det beregnes, hvor meget nyt kabel der skal lægges på det overliggende spændingsniveau for at forsyne de nye stationer.

En opsummering af den samlede proces for beregning af netforstærkning er vist på figur 3.4.



Figur 3.4 Opsummering af proces for forstærkning.

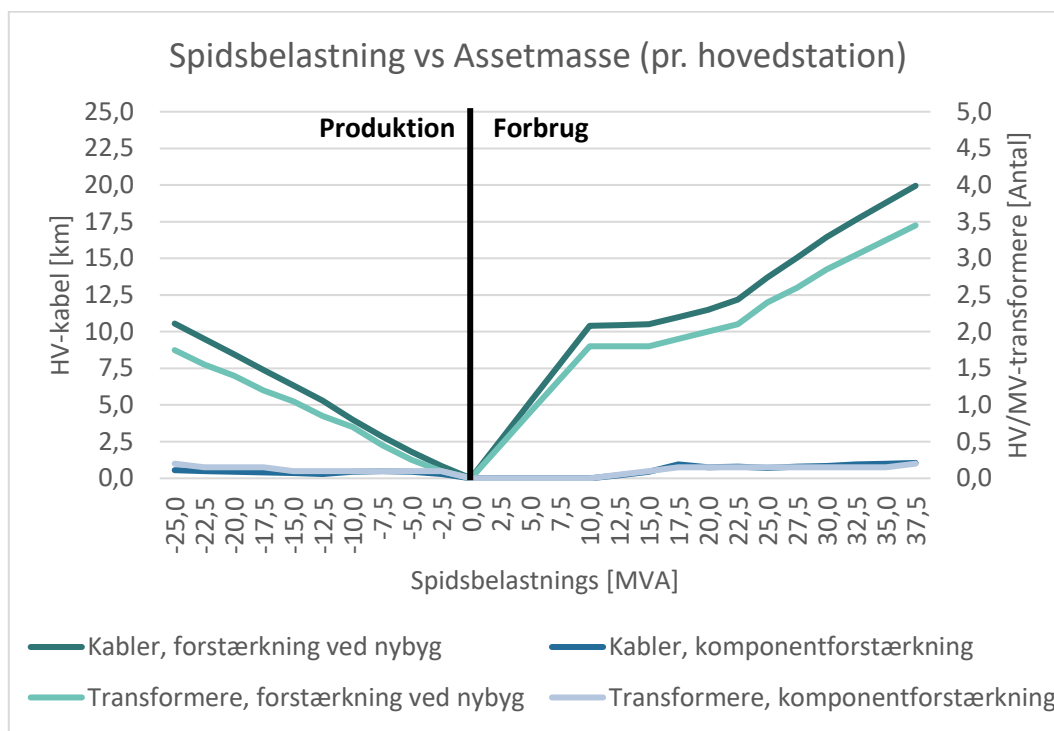
3.3. ANALYSEBASERET FORSTÆRKNING AF HØJSPÆNDINGSNET

Højspændingsnettet er opbygget som et modelnet. En af begrundelserne for dette var den store variation i opbygningen af højspændingsnet, som gør det svært at generalisere dem, ligesom der er gjort for lav- og mellemspændingsnet.

Det er derfor heller ikke muligt at foretage en regelbaseret forstærkning af højspændingsnet. I stedet benyttes en simple analysebaseret forstærkning. Denne analysebaserede forstærkning benytter en ikke-lineær kurve til at beskrive forholdet mellem effekt og antal komponenter – en såkaldt power-to-asset-kurve.

Da modelnettet er baseret på en gennemsnitsbetragtning, gør det samme sig gældende for de tilhørende power-to-asset-kurver. Modelnettet beskriver en gennemsnitlig hovedstation i hver af de to arketyper for højspænding. Analyser af de to arketyper viser, at de på forbrugssiden har mange ens karakteristika, mens der er forskelle på produktionssiden. Grundet ligheden er der brugt en fælles power-to-asset-kurve for begge arketyper.

Selve power-to-asset-kurven er designet på baggrund af både beregninger på eksisterende hovedstationer, men også antagelser om, hvordan den gennemsnitlige hovedstation sandsynligvis vil ændre sig, efterhånden som både forbrug og produktion stiger. Den benyttede power-to-asset-kurve er vist i figur 3.5. Power-to-asset-kurven viser det antal komponenter, som er nødvendige for en bestemt effekt fra enten forbrug eller produktion.



Figur 3.5 Power-to-asset-kurve til analysebaseret forstærkning af højspændingsnet.

Power-to-asset-kurven i figur 3.5 har en særlig opbygning. For det første er det en samlet kurve for både forbrug og produktion – forbrug til højre og produktion til venstre. For det andet kan den kun anvendes ved de højeste fraktiler for forbrug og produktion. Derudover kan den kun benyttes, når udgangspunktet er det gennemsnitlige forbrug og produktion, som findes i modelnettet for højspændingsnet.

Der er fx et helt lineært forløb på forbrugssiden op til 10 MVA. Dette skyldes, at 10 MVA er den gennemsnitlige spidsbelastning fra forbrug i modelnettet. Denne del af power-to-asset-kurven er udtryk for det nuværende forhold mellem effekt og antal komponenter. Når hovedstationer typisk har to transformere, kan det i grove træk oversættes til, at hver hovedstation ikke må belastes med mere end 50 %, hvilket resulterer i den stejle hældning.

Det efterfølgende forløb på forbrugssiden fra 10 MVA til ca. 20 MVA er udtryk for, at der stadig er en vis grad af tilgængelig kapacitet på hovedstationer, inden de skal forstærkes. Samtidig vil det i dette interval være muligt at foretage 1-1-forstærkning (komponentforstærkning) af transformerne. Der er derfor begrænset forstærkning med nye transformere (1-mange-forstærkning) i dette område, da denne kapacitet udnyttes, inden der foretages forstærkning, og en del af de forstærkninger der foretages, er 1-1-forstærkninger.

Fra ca. 20 MVA og videre frem mod endnu højere forbrug overgår kurven langsomt til et lineært forløb, hvor det antages, at hovedstationerne grundet den stigende belastning langsomt bevæger sig fra at have to transformere til at have tre transformere, således at hovedstationen kan belastes med op til 70 % af den installerede kapacitet og stadig have N-1-reserve. Dette reducerer hældningen på kurven i forhold til det første stykke mellem 0 og 10 MVA.

På produktionssiden er kurven overvejende lineær og har en endnu lavere hældning end afslutningen af forbrugssiden. Dette skyldes, at der i distributionsnet i udgangspunktet ikke laves N-1-reserve for produktion. Samtidig er større produktionsanlæg af tekniske årsager ofte tilsluttet deres egen transformere i hovedstationer med meget produktion. Disse forhold gør, at hovedstationen kan belastes med op til 100 % af den installerede kapacitet på produktionssiden.

Power-to-asset-kurverne for HV-kabler følger fuldstændig samme struktur, som kurverne for transformere.

4. DIMENSIONERINGSKRITERIER

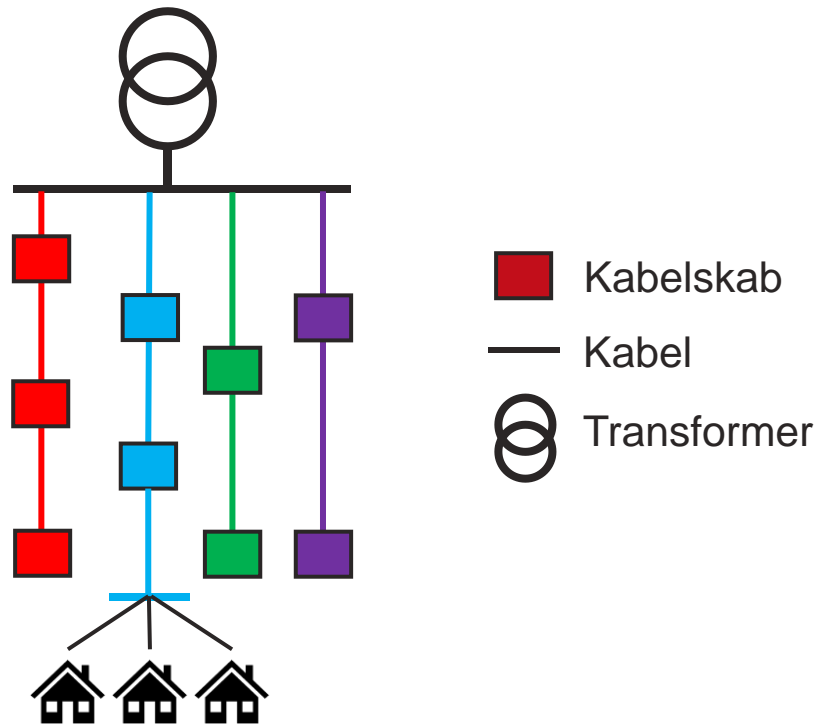
Elnettet dimensioneres ud fra en lang række forhold, hvor mange forskellige parametre spiller en rolle. Der ligger mange tekniske hensyn bagved, men det kan i grove træk opsummeres til, at elnettet skal kunne overføre den effekt, der kræves på det tidspunkt af året, hvor forbruget er højest, og på det tidspunkt af året, hvor produktionen er højest. Hvis der ikke er tilstrækkelig kapacitet, vil elnettet blive overbelastet med et afbrud til følge.

Når elnettet dimensioneres, ses der ikke kun på, hvilken kapacitet elnettet skal have for at kunne håndtere det aktuelle forbrug og produktion, men også på, hvilken kapacitet der skal bruges i fremtiden. Komponenter i elnettet har levetider på 40 år eller derover, så der skal planlægges langt ud i tid.

I det følgende gennemgås opbygning og dimensioneringskriterier for lav-, mellem- og højspændingsnet. De viste opbygninger og kriterier er en simplificering og generalisering af en række forskellige opbygninger, regler og dimensioneringskriterier, som benyttes, når lokale net bygges eller forstærkes/udvides. I de enkelte områder vil der være forskellige opbygninger af elnettet, forskellige regler og forskellige dimensioneringskriterier, som afhænger af både netselskabet og særlige lokale eller historiske forhold.

4.1. DIMENSIONERINGSKRITERIER FOR LAVSPÆNDINGSNET

Lavspændingsnet er typisk opbygget som radialnet – se illustration i figur 4.1.



Figur 4.1 Illustration af den typiske opbygning af et lavspændingsnet med transformere, kabler, kabelskabe og kunder. Lavspændingsnet er typisk opbygget som radialnet – hver udføring (radial) er vist med egen farve.

Denne opbygning er afgørende for dimensioneringskriterierne for lavspændingsnet. Hver udføring (radial) forsyner nogle bestemte kabelskabe, og hvert kabelskab forsyner nogle bestemte kunder. Hver udføring kan dimensioneres individuelt, uafhængig af de andre udføring.

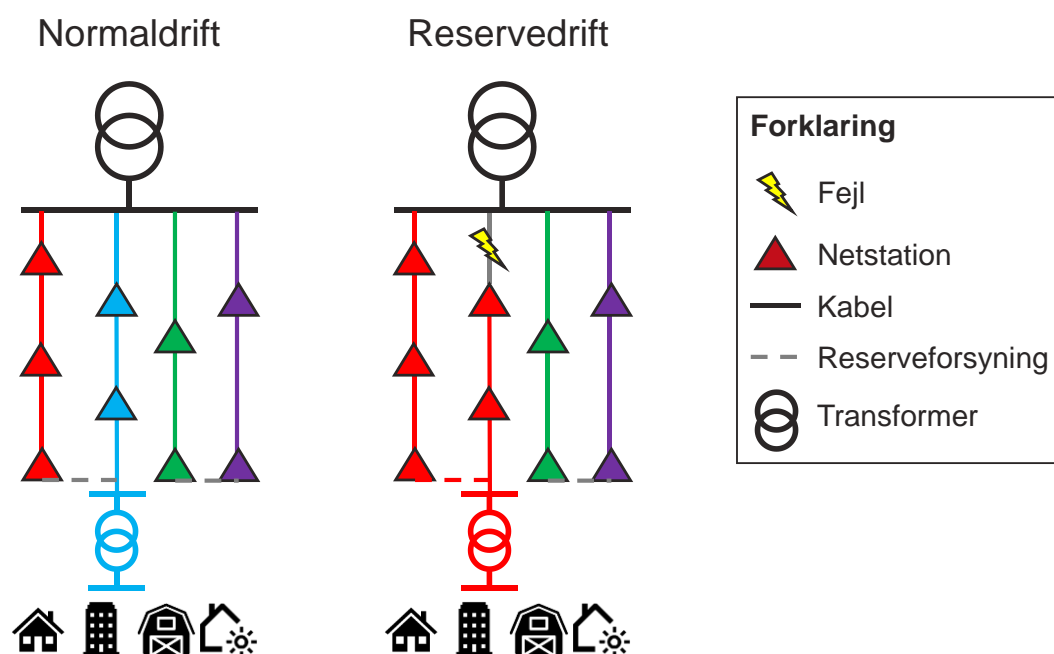
For hver udføring evalueres en række tekniske dimensioneringskriterier – de mest prominente vil oftest være belastningen af kablerne og spændingen i kabelskabene. Kablernes belastning måles i forhold til deres teoretiske kapacitet. Der er en række tekniske forhold, som gør, at det i praksis aldrig er muligt at udnytte hele den teoretiske kapacitet. Når der tages hensyn til disse tekniske begrænsninger, vil kabler i lavspændingsnet aldrig kunne belastes med mere end 90 %.

Spændingen måles i forhold til de 230 V, som skal leveres til kunderne. Spændingen hos kunderne må variere med $\pm 10\%$ i forhold til den nominelle værdi på 230 V. Hvad angår dimensioneringskriterier er det dog nødvendigt at arbejde med et langt snævrere interval. Dette skyldes en lang række tekniske forhold, som skal sikre, at spændingen hos kunden altid holder sig inden for de $\pm 10\%$. Typiske dimensioneringskriterier i lavspændingsnet tillader spændingen at variere mellem $+2,5\%$ og -5% i forhold til den nominelle værdi på 230 V.

Transformeren i netstationen, som forbinder mellem- og lavspændingsnettet, vil oftest ikke være udsat for større tekniske begrænsninger og vil derfor typisk kunne belastes med 100 % af den teoretiske kapacitet.

4.2. DIMENSIONERINGSKRITERIER FOR MELLEMPÆNDINGSNET

Mellempændingsnet er mere komplicerede end lavspændingsnet. Der er flere tekniske hensyn og større variation i opbygning, end i lavspændingsnet. Ligesom i lavspændingsnet vil de mest prominente dimensioneringskriterier i mellempændingsnet oftest være belastningen og spændingen. Mellempændingsnet bruger dog en anderledes opbygning end lavspændingsnet. De to mest benyttede opbygninger af mellempændingsnet er vist i figur 4.2 og figur 4.3, hvor det særligt er opbygningen som radialnet, som bruges meget.

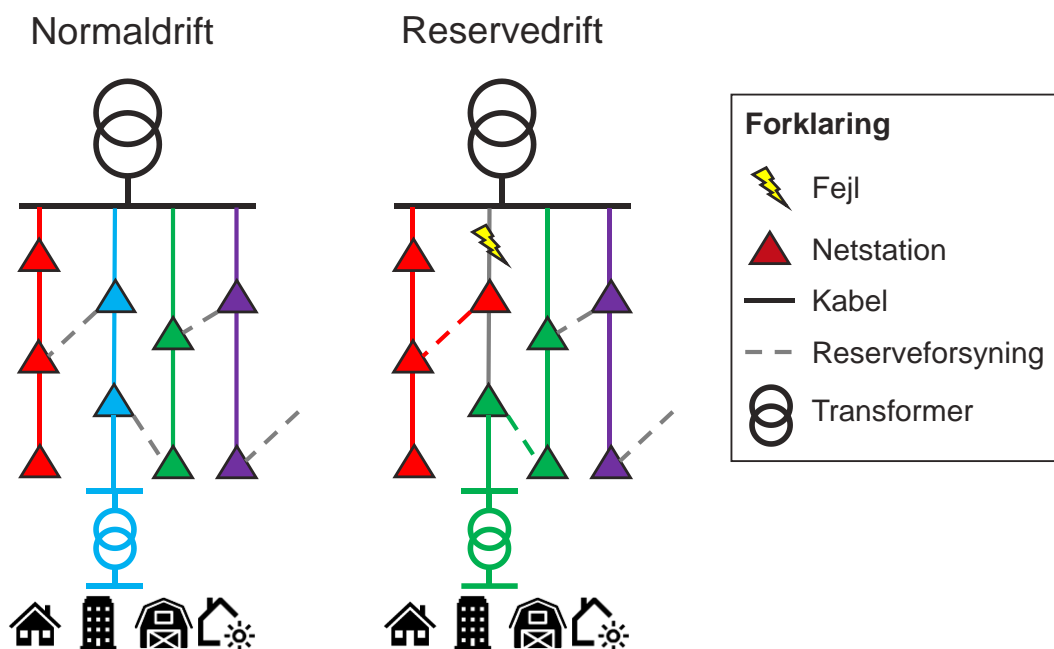


Figur 4.2 Illustration af et mellempændingsnet, som er opbygget som ringnet, med angivelse af transformer, kabler og netstationer. Opbygningen vises i normaldrift og reservedrift, hvor hver radial er vist med egen farve.

I forhold til lavspændingsnet skal der i mellemspændingsnet tages hensyn til reservedrift, også betegnet som N-1. Fordi mellemspændingsnet forsyner mange kunder, og fordi større vedligehold og reparation af fejl kan tage dage eller uger, er det nødvendigt at kunne forsyne kunder via mere end én vej. Når et kabel eller en transformer er ude af drift pga. vedligehold eller fejl, bruges reserveforbindelser til at forsyne kunderne fra andre kabler og transformere.

Når et mellemspændingsnet er i reservedrift vil nogle kabler og transformere være markant højere belastet end under normaldrift. På figur 4.2 og figur 4.3 illustreres det, hvordan en fejl på et kabel leder til, at reserveforbindelserne tages i brug, og at kunderne på den radial, som oplever fejlen, forsynes fra naboradialer.

I figur 4.2, hvor nettet er opbygget som ringnet, er der kun én reserveforbindelse, og det betyder, at den røde naboradial skal forsyne både sine egne kunder og den fejlede blå radials kunder – altså skal den røde radial forsyne dobbelt så mange kunder i reservedrift i forhold til normaldrift.



Figur 4.3 Illustration af et mellemspændingsnet, som er opbygget som radialnet, med angivelse af transformer, kabler og netstationer. Opbygningen vises i normaldrift og reservedrift, hvor hver radial er vist med egen farve.

I figur 4.3, hvor nettet er opbygget som radialnet, vil der typisk være mere end én reserveforbindelse. Det betyder, at kunderne på den blå radial kan forsynes fra flere naboradialer, i eksemplet fra den røde og den grønne radial. Hver af disse naboradialer overtager halvdelen af belastningen fra den fejlede blå radial og skal i reservedrift kunne forsyne 50 % flere kunder end i normaldrift.

For ringnet er der altid kun én reserveforsyning, men for radialnet, som er den mest udbredte opbygning, vil der oftest være to eller flere reserveforsyninger til hver radial. Dette giver mange forskellige mulige konfigurationer for reservedrift, afhængig af hvilken komponent der er ude af drift. Når netselskaber skal regne på mellemspændingsnet, regner de på alle disse konfigurationer. Da det er omfattende at regne på alle mulige konfigurationer, regnes der i modellen kun på normaldrift.

Når dimensioneringskriteriet for kabler skal fastsættes, ses der derfor på den højeste belastning, som kan tillades i normaldrift, (med hensyn til at kablerne vil opleve en markant højere belastning i reservedrift). Uden for de største byer er mellemspændingsnet overvejende opbygget som radialnet, hvor der oftest er to reserveforsyninger eller mere. For disse elnet (blandede net med lav energitæthed) vil kabler typisk kunne belastes med op til 70 % i normaldrift. I de største byer bruges en blanding af ringnet og radialnet. Som et snit over disse og med respekt for andre tekniske begrænsninger regnes der i modellen med, at disse net (blandede net med høj energitæthed) vil kunne belastes med op til 56 % i normaldrift.

Der skal overholdes en række dimensioneringskriterier i forhold til spænding. Modsat lavspændingsnet har mellemspændingsnet en vis grad af spændingsregulering. Dette gør, at dimensioneringskriterierne kan være lidt bredere end for lavspændingsnet, men modvirkes samtidig af behovet for, at spændingen også skal holdes inden for $\pm 10\%$ i reservedrift. I modellen tillader dimensioneringskriterierne, at spændingen i blandede net med lav hhv. høj energitæthed kan variere mellem $+2,5\%$ og -6% hhv. $+2,5\%$ og $-5,5\%$.

Hvad angår transformerne i hovedstationen, som forbinder høj- og mellemspændingsnettet, er der ligesom for kablerne behov for at kunne forsyne kunderne i reservedrift. En hovedstation vil oftest have to transformere, mens store hovedstationer kan have tre transformere. For at kunne forsyne kunderne i reservedrift, vil én af transformerne på stationen udelukkende være der som reserve og ikke blive benyttet i normaldrift. Hvis en transformer i hovedstationen er ude af drift pga. vedligehold eller fejl, vil denne reservetransformer skulle overtage forsyningen af kunderne. Denne reservetransformer omtales som stationsreserve. Stationsreserve kan suppleres eller erstattes med brug af reserveforbindelser mellem radialer, så noget af belastningen kan flyttes til andre hovedstationer. Denne brug af reserveforbindelser mellem radialer omtales som netreserve.

Alle hovedstationer har stationsreserve, netreserve eller en blanding af begge dele. Denne kompleksitet gør det svært at fastsætte et generisk dimensioneringskriterie for, hvor høj en belastning der kan tillades på transformerne i hovedstationer. I stedet bruges et modelnet, som forklaret i afsnittet om dimensioneringskriterier for højspændingsnet.

4.3. DIMENSIONERINGSKRITERIER FOR HØJSPÆNDINGSNET

Højspændingsnet har en endnu højere kompleksitet end mellemspændingsnet. Opbygningen afhænger i høj grad af lokale forhold. Ud over tekniske begrænsninger og reserve-drift skal der i højspændingsnet tages hensyn til den formaskede opbygning og drift af disse net, og i nogle højspændingsnet skal der også tages hensyn til parallelløb med transmissionsnettet. Grundet de mange forhold, som spiller ind, og den høje afhængighed af lokale forhold kan der ikke laves generaliseringer af hverken opbygning eller dimensioneringskriterier for højspændingsnet.

I stedet er der lavet et modelnet, som kan bruges til at estimere behovet for forstærkning af hovedstationer og linjer i højspændingsnet. Modelnettet er nærmere beskrevet i RA636.

5. KALIBRERING

For at sikre at de forstærkninger, som beregnes i TEGRA, er retvisende, er der lavet en kalibrering af både forstærkningsreglerne og dimensioneringskriterierne. Kalibreringen er en tidskrævende og omfattende proces.

Ligesom analyse og forstærkning er kalibreringen opdelt efter spændingsniveau og nettes arketyper. Den individuelle kalibrering af hver arketype giver en større nøjagtighed i modellen. Kalibreringen fokuserer på de tekniske parametre omkring netforstærkning – altså er der tale om en teknisk kalibrering.

Selve kalibreringen er udføres ved at sammenligne TEGRAs resultater for netforstærkning med netselskabernes egne manuelle beregninger. Disse sammenligninger laves over et bredt spektrum af tekniske parametre og ved forskellige stigninger i den dimensionerende effekt. Ved at fokusere kalibreringen på tekniske parametre og et bredt spektrum af effektstigninger sikres det, at kalibreringen er robust og uafhængig af det scenarie, der regnes på.

5.1. KALIBRERING AF FORSTÆRKNING I LAV- OG MELLEmspændingsnet

I lav- og mellemspændingsnet er der foretaget en omfattende kalibrering af både forstærkningsreglerne og dimensioneringskriterierne, hvor der ses på en række tekniske parametre. Overordnet set sikres det, at TEGRA:

- forstærker den rigtige andel net og udføringer/radialer
- forstærker af den rigtige årsag (strøm, spænding eller begge)
- vælger den rigtige forstærkningsløsning (komponentforstærkning eller forstærkning ved nybyg)
- forstærker med den rigtige mængde netstationer, udføringer/radialer og kabel.

Ved kalibrering vurderes alle disse parametre både individuelt og som helhed. For at forstærkningerne i TEGRA er retvisende, skal **alle** tekniske parametre passe.

Hvorfor er det vigtigt, at alle parametre passer?Eksempel 1:

TEGRA forstærker dobbelt så mange net, som de manuelle beregninger gør, men har samme mængde forstærkning som de manuelle beregninger.

I dette eksempel er TEGRA ikke retvisende, da modellen overvurderer, hvor mange net der skal forstærkes, og undervurderer, hvor meget hvert net skal forstærkes. Det vil lede til resultater, som er både teknisk og økonomisk forkerte.

Eksempel 2:

De manuelle beregninger viser, at nettene primært forstærkes grundet overbelastning, og modellen forstærker primært på grund af spænding.

I dette eksempel vil TEGRA ikke være retvisende, da den forstærker af de forkerte årsager. Modellen vil derfor ikke kunne bruges til at vurdere de tekniske og økonomiske konsekvenser af fx spændingsregulering. Da modellen forstærker pga. spænding, vil den overvurdere, hvor og hvornår spændingsregulering kan erstatte almindelig netforstærkning, og hvilke økonomiske konsekvenser øget brug af spændingsregulering har.

For at sikre at kalibreringen er så nøjagtig som muligt, er den gennemført på flere niveauer:

- Statistiske sammenligninger
- 1-til-1-sammenligninger
- Detaljerede undersøgelser af de manuelle beregninger.

De statistiske sammenligninger er sammenligninger, hvor der ses på de opsummerede nøgleværdier for modellen og de manuelle beregninger. Det vil sige, at der ses på den gennemsnitlige forstærkning på tværs af alle net. Dette er den primære kalibrering. Den statistiske sammenligning har den største robusthed, men er meget afhængig af antallet af net, der er lavet manuelle beregninger for.

1-til-1-sammenligninger er direkte sammenligninger mellem netselskabets forstærkning af et bestemt net og modellens forstærkning af samme net. De kan kun laves på de net, som findes i både modellen og de manuelle beregninger. Disse sammenligninger giver et mere dybdegående indblik i, om modellen også er holdbar på det enkelte net og et mere detaljeret indblik og forståelse for, om forstærkningsreglerne og -parametrene er retvisende. De er mere komplicerede at lave og har forventeligt også større afvigelser end de statistiske sammenligninger. Men de giver et nødvendigt indblik og bruges derfor som sekundær sammenligning.

Sidst, men ikke mindst, foretages der mere detaljerede undersøgelser af de manuelle beregninger for at sikre, at der ikke er nogle systematiske fejl i forstærkningsreglerne og -parametrene. De detaljerede undersøgelser bruges også til at identificere, om der er nogle særlige omstændigheder for forstærkningen af bestemte net i de manuelle beregninger, som kan gøre kalibreringen sværere eller forklare afvigelser mellem modellen og de manuelle beregninger.

5.1.1. Parametre anvendt før og efter kalibrering

De oprindelige dimensioneringskriterier for lav- og mellemspændingsnet i TEGRA tog udgangspunkt i typiske værdier og teoretiske betragtninger. Disse er blevet justeret på baggrund af kalibreringen. De kalibrerede værdier er ikke nødvendigvis retvisende for de dimensioneringskriterier, der bruges i netselskaberne, men er de værdier, som i TEGRA-modellen giver den mest korrekte netforstærkning af elnettene. Dimensioneringskriterier før og efter kalibrering fremgår af tabel 5.1.

Net	Parameter	Grænseværdi	
		Før kalibrering	Efter kalibrering
LV	Overbelastning kabler	80,0 %	90,0 %
	Overbelastning transformere	100,0 %	110,0 %
	Dimensioneringskriterie for overspænding	1,025 pu	1,025 pu
	Dimensioneringskriterie for underspænding	0,950 pu	0,950 pu
MV	Overbelastning kabler	70,0 %	70,0 %
	- Særligt for HEB		56,0 %
	- Særligt for HEF		56,0 %
	Dimensioneringskriterie for overspænding	1,025 pu	1,025 pu
	Dimensioneringskriterie for underspænding	0,950 pu	0,950 pu
	- Særligt for HEB		0,945 pu
	- Særligt for HEF		0,945 pu
	- Særligt for LEB		0,940 pu
HEB: Høj energitæthed, blandet net			
HEF: Høj energitæthed, blandet net med fjernvarmeværk			
LEB: Lav energitæthed, blandet net			

Tabel 5.1 Oversigt over anvendte dimensioneringskriterier før og efter kalibrering.

5.2. KALIBRERING AF FORSTÆRKNING I HØJSPÆNDINGSNET

I højspændingsnet er der lavet en mindre omfattende kalibrering, som passer bedre med den analysebaserede forstærkning. De power-to-asset-kurver, som bruges til forstærkning af transformere og kabler, er blevet justeret, så de er retvisende i forhold til de manuelle beregninger, således at både mængden af 1-1-forstærkning (komponentforstærkning) og 1-mange-forstærkning (forstærkning ved nybyg) er retvisende.

6. RESULTATER

Efter netforstærkning ligger der tre sæt af resultater. De tre sæt resultater dækker over ét sæt resultater for højspændingsnet og to sæt resultater for lav- og mellemspændingsnet.

6.1. RESULTATER FOR LAV- OG MELLEMSPÆNDINGSNET

Resultaterne for lav- og mellemspændingsnet er delt i to sæt - detaljerede resultater for hvert net og opsummerede resultater pr. arketype. De to sæt resultater har forskellige formål, som er beskrevet i de følgende afsnit.

6.1.1. Detaljerede resultater for hvert net

Dette sæt af resultater indeholder detaljerede oplysninger om netforstærkningen i hvert enkelt net. For hvert net opgives:

- Årsagen til forstærkning
- Om der er lavet 1-1-forstærkning eller 1-mange-forstærkning
- Resultatet af hver type forstærkning (transformerforstærkning, strømforstærkning og spændingsforstærkning) angivet som mængder af kabler og transformere
- Resultatet af den samlede forstærkning (inkl. nyt kabel i overliggende net) angivet som mængder af kabler og transformere.

De detaljerede resultater bruges til dybdegående analyser af netforstærkning og i forbindelse med kalibrering, hvor de spiller en vigtig rolle ift. at sikre, at algoritmen opfylder alle de tekniske krav til nøjagtighed.

6.1.2. Aggregerede resultater pr. arketype

Dette sæt af resultater indeholder aggregerede resultater pr. arketype. For hver arketype i lavspændingsnet opgives:

- Mængde af kabel, som komponentforstærkes (1-1-forstærkning), angivet i procent.
- Mængde af kabel, som bygges nyt (1-mange-forstærkning), angivet i procent.
- Mængde af netstationer, som komponentforstærkes (1-1-forstærkning), angivet i procent.
- Mængde af netstationer, som bygges nyt (1-mange-forstærkning), angivet i procent.
- Mængde af kabel, som bygges nyt i overliggende net (1-mange-forstærkning), angivet i procent.

For hver arketype i mellemspændingsnet opgives:

- Mængde af kabel, som skal komponentforstærkes (1-1-forstærkning), angivet i procent.
- Mængde af kabel, som bygges nyt (1-mange-forstærkning), angivet i procent.

De aggregerede resultater pr. arketype bruges direkte til den efterfølgende skalering til landsplan, som er beskrevet i RA639.

6.2. RESULTATER FOR HØJSPÆNDINGSNET

Dette sæt af resultater indeholder aggregerede resultater for højspændingsnet. For hver arketype i højspændingsnet angives:

- Mængde af kabel, som komponentforstærkes (1-1-forstærkning), angivet i procent.
- Mængde af kabel, som bygges nyt (1-mange-forstærkning), angivet i procent.
- Mængde af hovedstationer, hvor transformere skal komponentforstærkes (1-1-forstærkning), angivet i procent.
- Mængde af hovedstationer, som skal bygges nyt (1-mange-forstærkning), angivet i procent.

De aggregerede resultater pr. arketype bruges direkte til den efterfølgende skalering til landsplan, som er beskrevet i RA639.

APPENDIKS 1. DIMENSIONERINGSKRITERIER

I tabel a1.1 vises de dimensioneringskriterier, som anvendes i netanalysen og til beregning af netforstærkning. Værdierne er fremkommet på baggrund af de benyttede forstærkningsregler og manuelle beregninger fra netselskaberne. Værdierne er ikke nødvendigvis retvisende for de dimensioneringskriterier, der bruges i netselskaberne, men er de værdier, som i TEGRA-modellen giver den mest korrekte netforstærkning af elnettene.

Net	Parameter	Grænseværdi
LV	Overbelastning kabler	90,0 %
	Overbelastning transformer	110,0 %
	Dimensioneringskriterie for overspænding	1,025 pu
	Dimensioneringskriterie for underspænding	0,950 pu
MV	Overbelastning kabler	70,0 %
	- Særligt for HEB	56,0 %
	- Særligt for HEF	56,0 %
	Dimensioneringskriterie for overspænding	1,025 pu
	Dimensioneringskriterie for underspænding	0,950 pu
	- Særligt for HEB	0,945 pu
	- Særligt for HEF	0,945 pu
	- Særligt for LEB	0,940 pu
HEB: Høj energitæthed, blandet net		
HEF: Høj energitæthed, blandet net med fjernvarmeværk		
LEB: Lav energitæthed, blandet net		

Tabel A1.1 Oversigt over anvendte dimensioneringskriterier.

Der fremgår ikke dimensioneringskriterier for højspændingsnet af tabel a1.1, da højspændingsnet er modelleret på en sådan måde, at der ikke er direkte anvendelse af dimensioneringskriterier ifm. netanalyse og netforstærkning.

APPENDIKS 2. OVERSIGT OVER KOMPONENTKATEGORIER

Benchmarkkategori	Overordnet komponentgruppe	Tarifkunde-kategori
30-60 kV kabel, tryksat olie-kabel	HV-kabler	A-høj
30-60 kV kabel, andre		
30-60 kV kabel, sø		
30-60 kV slukkespole		
30-60 kV luftledning		
30-60 kV kondensatorbatteri	Kondensatorbatteri	
30-60 kV åbent felt med effektafbryder	HV-stationer, 30-60 kV felter	A-lav
30-60 kV åbent felt med adskillere uden effektafbryder		
30-60 kV gasisoleret felt med effektafbryder		
30-60 kV transformer < 20 MVA	HV-stationer, 30-60 kV transformer	
30-60 kV transformer ≥ 20 MVA		
30-60 kV shuntreaktor	Shuntreaktor	A-høj
10-20 kV felt med effektafbryder	HV-stationer, 10-20 kV felter	A-lav
10-20 kV landkabel, APB	MV-kabler	B-høj
10-20 kV landkabel, PEX		
10-20 kV kabel, sø		
10-20 kV luftledning		
10-20 kV slukkespole		

Benchmarkkategori	Overordnet komponentgruppe	Tarifikunde-kategori
10-20/0,4 kV netstation, konventionel uden transformere	MV-stationer	B-lav
10-20/0,4 kV netstation, konventionel med transformereffekt < 500 kVA		
10-20/0,4 kV netstation, konventionel med transformereffekt 500-2000 kVA		
10-20/0,4 kV netstation, konventionel med transformereffekt > 2000 kVA		
10-20/0,4 kV netstation, automatiseret uden transformere		
10-20/0,4 kV netstation, automatiseret med transformereffekt < 500 kVA		
10-20/0,4 kV netstation, automatiseret med transformereffekt 500-2000 kVA		
10-20/0,4 kV netstation, automatiseret med transformereffekt > 2000 kVA		
0,4 kV kabel	LV-kabler	C
0,4 kV luftledning		
0,4 kV kabelskabe	Kabelskabe	
Målere - fjernaflæsning	Målere	Målere
Målere - ikke fjernaflæsning		