PHASE TO PHASE

Stochastische loadflow.

Beschrijving algoritme van de stochastische loadflow.

01 197 pmo

26-10-2001

Phase to Phase BV
Utrechtseweg 310
Postbus 100
6800 AC Arnhem
T: 026 356 38 00
F: 026 356 36 36
www.phasetophase.nl

INHOUD

1 INLEIDING

1.1 Probleemstelling

Netten voor elektriciteitsdistributie zijn altijd vrij ruim gedimensioneerd. Omdat de belasting van klant tot klant sterk kan fluctueren, hebben elektriciteitsbedrijven altijd het zekere voor het onzekere genomen en de kabels dikker dan strikt nodig gekozen. De belastingen worden in het ontwerpproces altijd met hun maximale waarde aangenomen. Hierdoor wist de ontwerper absoluut zeker dat de elektrische spanning nooit onder de gestelde eisen zou komen. Tegenwoordig worden de elektriciteitsbedrijven gedwongen (o.a. door de DTe) tot kostenbesparing. Een andere ontwerpmethode ten aanzien van de kabels kan tot besparingen leiden. Door de introductie van stochastische technieken in de modellering van de belastingen in het net, worden de marges minder groot genomen en kunnen de kabels beter worden gekozen in relatie tot het werkelijke gedrag in de praktijk.

1.2 Doelstelling

Ontwikkelen van een nieuwe op stochastische techniek gebaseerde methode om belastingen in een net voor elektriciteitsdistributie te modelleren en daarmee de toestand van een distributienet door te rekenen, zodanig dat een kostenbesparing op de infrastructuur behaald wordt.

1.3 Aanpak

In het project staan twee ontwikkelingen centraal:

- Ontwikkelen van een nieuwe op stochastische techniek gebaseerde methode om belastingen in een net voor elektriciteitsdistributie te modelleren.
- Modellering van een nieuwe methode om met "onzekere" stochastische belastingen de toestand van een distributienet door te rekenen.

Het onderzoek wordt uitgevoerd met de volgende fasering:

- Beschrijving stochastisch model van de belasting
- Beschrijving algoritme van de stochastische loadflow.

Technisch probleem:
In het stochastische model wordt uitgegaan van begrippen als verwachtingswaarde en spreiding. Dat zijn begrippen waar de ontwerper van laagspanningsnetten geen raad mee weet. Er moet een zodanige modellering worden gekozen, dat een vertaalslag van de huidige praktijk kan worden gemaakt. De modellering wordt bepaald door het type van de belasting (soort gebruiker en opwekker) en het aantal belastingen heeft invloed op de gelijktijdigheid. De mogelijkheid om de belastingen voldoende en eenduidig met stochastische parameters te kunnen beschrijven is onzeker. Zodra de modelvorming van de belasting vastligt, moet het verwerkt worden in de netberekeningen, die traditioneel gebaseerd zijn op determinischische modellen. De wiskundige aanpak daarvan is onzeker.

Oplossingsrichting:
De modellering van de belasting vindt plaats met behulp van verwachtingswaarde en spreiding, met de veronderstelling dat het stochastische gedrag normaal verdeeld is. De netberekening wordt uitgevoerd als superpositie van de separate door de verwachting en de variantie beschreven situaties.

De eerste fase van het onderzoek, waarin het stochastische model van de belasting is onderzocht, is reeds uitgevoerd en beschreven (Phase to Phase, 2001). Conclusie uit deze fase is dat gelijksoortige belastingen op willekeurige tijdstippen gemodelleerd kunnen worden met onafhankelijke normale kansverdelingsfuncties. Het gedrag in de tijd kan beschreven worden met tijdfuncties van gemiddelde waarde en spreiding van de normale verdelingen.

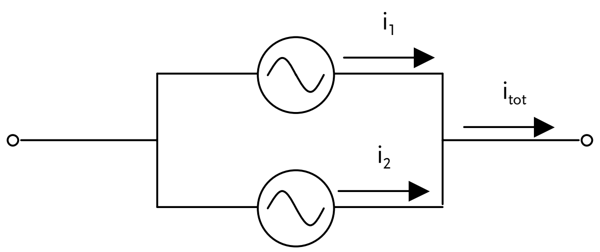
Dit rapport beschrijft de tweede fase, het onderzoek naar het algoritme om met de stochastische belastingsmodellen te kunnen rekenen.

2 METHODE

In een voorafgaand rapport (Phase to Phase, 2001) is beschreven hoe de belasting beschreven kan worden als een stochastisch signaal met een normale verdeling. Het belastingspatroon bestaat dan uit een reeks van normale kansverdelingfuncties, beschreven door tijdreeksen van gemiddelde $\mu(t)$ en spreiding $\sigma(t)$. In deze vervolgfase wordt de methode beschreven om deze manier van belastingmodellering te gebruiken in een planningstool voor distributienetten. Door deze nieuwe belastingmodellering te combineren met netberekeningen kan een beter beeld van het netgedrag worden verkregen.

2.1 De som van twee stochastische variabelen

De basis van de nieuwe netberekeningsmethode wordt gevormd door een admittantienetwerk, waarvan de belastingen zijn gemodelleerd als stroominjecties. Elke stroominjectie wordt voorgesteld door een stroombron. In onderstaand diagram zijn twee parallelgeschakelde onafhankelijke stroombronnen afgebeeld.



Figuur 1 Twee parallelgeschakelde stroombronnen

De totaalstroom van de parallelgeschakelde stroombronnen is op elk moment gelijk aan:

$$i_{tot} = i_1 + i_2 \qquad (1)$$

Maar ook indien de twee individuele stromen voorgesteld worden door stochastische variabelen geldt vergelijking (1). Indien we de stochastische stromen $\underline{i}_1$ en $\underline{i}_2$ elk voorstellen als stochastische variabelen, geldt uit de basiskennis van de theorie van de stochastische signalen dat de gemiddelde waarde van de som gelijk is aan de som van de afzonderlijke gemiddelde waarden:

$$\begin{aligned} E(\underline{i}_{tot}) &= E(\underline{i}_1 + \underline{i}_2) \\ &= E(\underline{i}_1) + E(\underline{i}_2) \end{aligned} \qquad (2)$$

Voor de spreiding gaat dat iets anders. We berekenen hieronder de variantie van de totaalstroom. De spreiding is daar dan de wortel uit:

$$\begin{aligned}
\mathrm{var}(\underline{i}_{tot}) &= E(\underline{i}_{tot}^{\ 2}) - (E(\underline{i}_{tot}))^2 \\
&= E(\underline{i}_1 + \underline{i}_2)^2 - (E(\underline{i}_1 + \underline{i}_2))^2 \\
&= E(\underline{i}_1^{\ 2} + \underline{i}_2^{\ 2} + 2\underline{i}_1\underline{i}_2) - (E(\underline{i}_1) + E(\underline{i}_2))^2 \\
&= E(\underline{i}_1^{\ 2}) + E(\underline{i}_2^{\ 2}) + E(2\underline{i}_1\underline{i}_2) - (E(\underline{i}_1))^2 - (E(\underline{i}_2))^2 - 2E(\underline{i}_1)E(\underline{i}_2) \qquad (3) \\
&= E(\underline{i}_1^{\ 2}) - (E(\underline{i}_1))^2 + E(\underline{i}_2^{\ 2}) - (E(\underline{i}_2))^2 + E(2\underline{i}_1\underline{i}_2) - 2E(\underline{i}_1)E(\underline{i}_2) \\
&= \mathrm{var}(\underline{i}_1) + \mathrm{var}(\underline{i}_2) + 2(E(\underline{i}_1\underline{i}_2) - E(\underline{i}_1)E(\underline{i}_2)) \\
&= \mathrm{var}(\underline{i}_1) + \mathrm{var}(\underline{i}_2) + 2\,\mathrm{cov}(\underline{i}_1, \underline{i}_2)
\end{aligned}$$

Wanneer de beide stromen $\underline{i}_1$ en $\underline{i}_2$ onafhankelijk van elkaar zijn, conform het uitgangspunt, is de covariantie gelijk aan nul. In dat geval is de variantie van de som gelijk aan de som van de varianties:

$$\mathrm{var}(\underline{i}_{tot}) = \mathrm{var}(\underline{i}_1) + \mathrm{var}(\underline{i}_2) \qquad (4)$$

Indien de beide stromen $\underline{i}_1$ en $\underline{i}_2$ echter gelijk aan elkaar zijn, wordt de covariantie van $\underline{i}_1$ en $\underline{i}_2$ gelijk aan de variantie. In dat geval gaat vergelijking (3) over in:

$$\mathrm{var}(\underline{i}_{tot}) = 4\,\mathrm{var}(\underline{i}_1) = 4\,\mathrm{var}(\underline{i}_2) \qquad (5)$$

In het geval dat er enige correlatie is tussen $\underline{i}_1$ en $\underline{i}_2$ ligt de variantie van de som tussen vergelijkingen (4) en (5). Echter, het uitgangspunt was dat de beide belastingen onafhankelijk zouden zijn.

Tussen spanning en stroom is de relatie gelineariseerd. De relatie is niets anders dan de wet van Ohm, toegepast op de verbindingen. Daarom kan geconcludeerd worden dat hetgeen voor de som van twee stochastische stromen geldt, ook geldt voor de som van twee stochastische spanningen.

2.2 Stochastische netwerkberekeningen

De stochastische stroom $\underline{i}$ kan worden opgedeeld in een gemiddelde waarde ($\bar{i}$) en een stochastische waarde ($\hat{i}$). Voor beide componenten geldt:

$$\underline{i} = \bar{i} + \hat{i} \qquad (6)$$

met:

$$\begin{aligned}
E(\bar{i}) &= c_1 \qquad & \mathrm{var}(\bar{i}) &= 0 \\
E(\hat{i}) &= 0 \qquad & \mathrm{var}(\hat{i}) &= c_2
\end{aligned}$$

Bovenstaande geldt zowel voor reële als complexe variabelen. De netwerkvergelijkingen, uitgeschreven als stroombronnen in combinatie met een lineaire admittantiematrix, zijn hieronder weergegeven in de admittantienotatie:

$$\begin{aligned}
&\underline{i} = Y \cdot \underline{u} \Rightarrow \\
&(\bar{i} + \hat{i}) = Y \cdot (\bar{u} + \hat{u})
\end{aligned} \qquad (7)$$

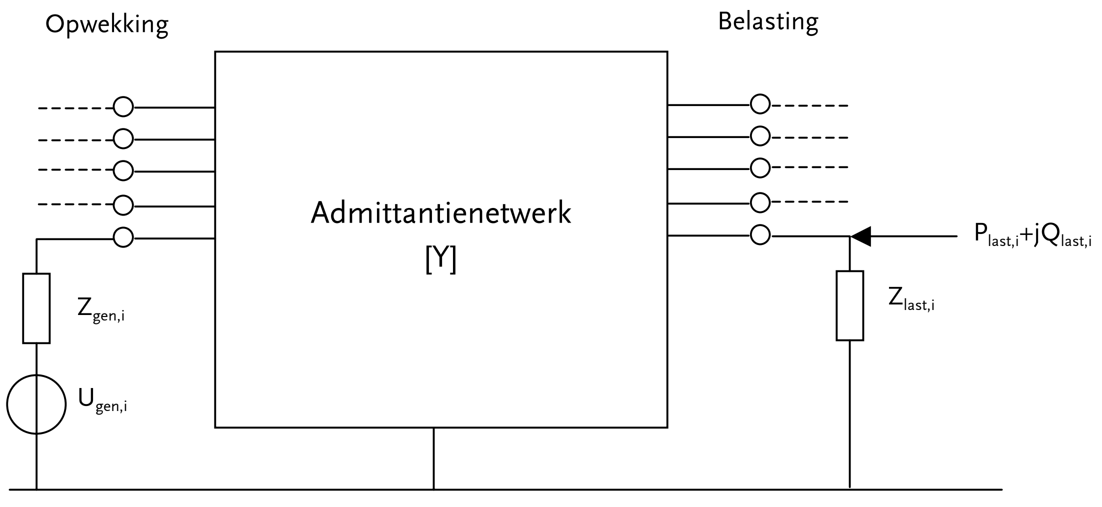
Hieruit concluderen we dat de gemiddelde waarden en de stochastische variabelen separaat kunnen worden behandeld. Dit wordt op basis van superpositie aangepakt.

3 IMPLEMENTATIE

Als uitgangspunt van de methode wordt de volledig opgeloste loadflow voor de gemiddelden van alle belastingen uitgerekend. De gemiddelden hebben geen stochastische component, zodat de gebruikelijke methode van loadflowberekening kan worden toegepast. De resultaten worden bewaard en leveren de gemiddelde waarden voor alle stromen en spanningen in het net. Vervolgens wordt van alle belastingen de stochastische stroomcomponent bepaald, waarna voor iedere belasting afzonderlijk de invloed op de varianties van stromen en spanningen in het net worden berekend en bewaard. Deze berekeningen vinden plaats door op het passieve netwerk per belasting een stroom ter grootte van de standaarddeviatie te injecteren. Daarbij zijn alle spanningsbronnen vervangen door een kortsluiting en alle andere stroombronnen vervangen door een opening. Dit is identiek aan de procedure die bij een kortsluitberekening volgens IEC 909 wordt gevolgd.

3.1 Berekening van de gemiddelde waarden

Alle belastingen worden voorgesteld door hun gemiddelde waarden μ_i, waarbij het model van de spannings-afhankelijkheid door de gebruiker vrij te kiezen is. De gevolgde oplosmethode is een Newton-Raphson loadflow. Bij een kwadratische spanningsafhankelijkheid wordt de belasting omgerekend naar een constante impedantie ($Z_{last,i}$). Bij een niet van de spanning afhankelijke belasting wordt de belasting omgerekend naar een vast werkzaam vermogen ($P_{last,i}$) en blindvermogen ($Q_{last,i}$). Bij een lineair van de spanning afhankelijke belasting spreken we van een constante stroombelasting. Deze wordt gemodelleerd door de belasting te modelleren als 50% kwadratisch en 50% niet afhankelijk van de spanning. In het vervolg gaan we ervan uit dat de belasting is opgegeven als een stroom. De gemiddelde waarde μ_i, voor belasting i, is een stroomwaarde, in onderstaand diagram omgerekend naar een mix van constante impedantie en constant vermogen.



Figuur 2 Berekening van de gemiddelde waarden met behulp van een loadflowberekening

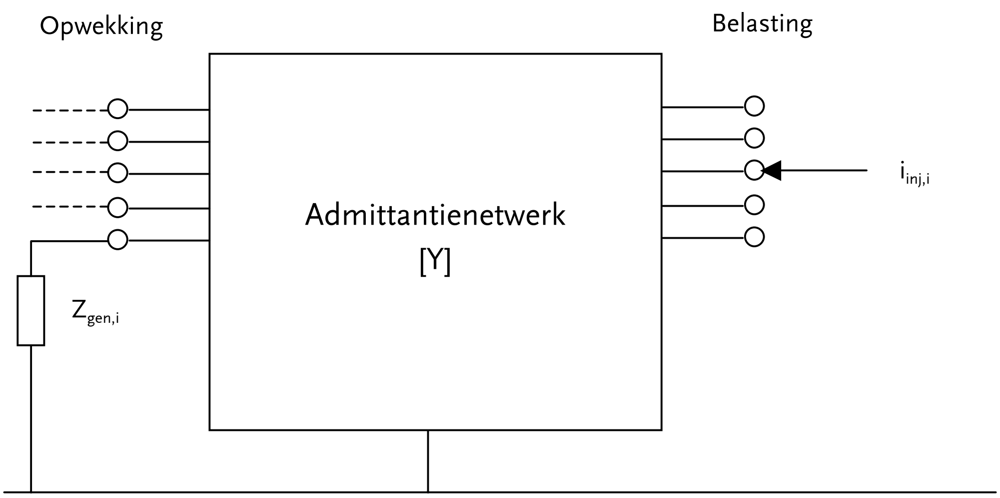
3.2 Berekening van de invloed van een stochastische component

Per belasting wordt de stochastische component vastgesteld. Deze wordt volgens vergelijking (6) voor knooppunt i voorgesteld door $\hat{i}_i$. De stochastische component wordt, in tegenstelling tot in de methode van berekening van de loadflow, niet omgerekend naar een constante impedantie of constant vermogen. De methode werkt met stroominjectie, zoals dat in de methode van IEC 909 gebeurt. De invloed van de stochastische component wordt berekend door op het passieve netwerk een stroom ter grootte van de standaarddeviatie van de stochastische component te injecteren.

$$i_{inj,i} = \sigma_i = \sqrt{\mathrm{var}(\hat{i}_i)} \qquad (8)$$

Doordat in het passieve netwerk alle spanningsbronnen zijn vervangen door kortsluitingen en alle stroombronnen zijn vervangen door een opening, heeft de stroominjectie tot gevolg dat alle berekende stromen en spanningen in het passieve netwerk volledig veroorzaakt zijn door deze ene geïnjecteerde stroom. Dat mag, omdat het netwerk voor het nominale werkpunt gelineariseerd is en omdat voor een lineair netwerk vergelijking (7) geldt.

In overeenstemming met het gestelde in het vorige hoofdstuk is het kwadraat van iedere takstroom gelijk aan de variantie van de stroom in de betreffende tak, veroorzaakt door de stochastische component van de belasting op knooppunt i. Dat geldt ook voor de spanningen: het kwadraat van de spanning op een knooppunt is gelijk aan de variantie van de spanning op dat knooppunt, veroorzaakt door de stochastische component van de belasting op knooppunt i. Alle berekende stromen en spanningen worden bewaard voor latere bewerking.



Figuur 3 Berekening van een stochastische component met behulp van een kortsluitstroomberekening

3.3 Berekening van de stochastische loadflow

De berekening van de stochastische loadflow bestaat uit het berekenen van de loadflow van de gemiddelde situatie en achtereenvolgend een voor een de gevolgen van een stroominjectie op ieder belastingsknooppunt. De resultaten van de stroominjectieberekeningen worden gekwadrateerd en opgeteld. Het resultaat levert de varianties van takstromen en knooppuntspanningen in het netwerk, veroorzaakt door alle stochastische belastingen. Met de resultaten van de loadflowberekening kunnen de te verwachten maxima en minima berekend worden.

Volgens vergelijking (4) mogen alle varianties in het netwerk, veroorzaakt door onafhankelijke stochastische belastingen (i), gewoon gesommeerd worden:

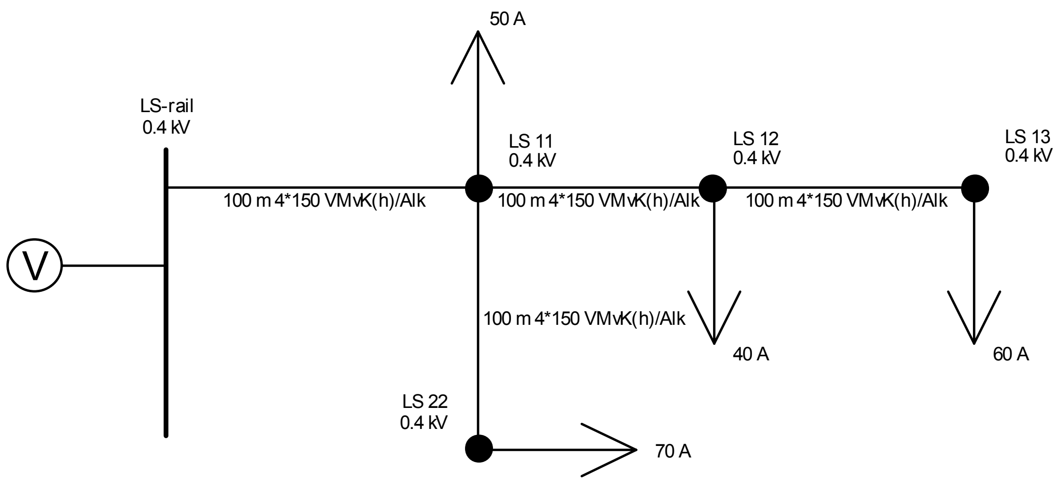
$$\mathrm{var}(\underline{i_{tak,jk}}) = \sum_{i=1}^{N} \mathrm{var}(\underline{i_{tak,jk}}_{,i})$$
$$\mathrm{var}(\underline{u_{knooppunt,k}}) = \sum_{i=1}^{N} \mathrm{var}(\underline{u_{knooppunt,k}}_{,i}) \qquad (9)$$

Voor berekening van het maximum maken we gebruik van de eigenschappen van de normale kansverdeling. De werkelijke waarde van een stochastische variabele ligt voor 85% zekerheid onder de waarde μ+σ en voor 97,5% zekerheid onder de waarde μ+2σ. Indien we kiezen voor twee maal de spreiding voor het vaststellen van de bovengrens, ligt het werkelijke maximum voor 97,5% zekerheid onder de gemiddelde waarde, vermeerderd met twee maal de spreiding:

$$i_{tak,jk,\max} = i_{tak,jk,gem} + 2 \cdot \sqrt{\mathrm{var}(i_{tak,jk})}$$
$$i_{tak,jk,\min} = i_{tak,jk,gem} - 2 \cdot \sqrt{\mathrm{var}(i_{tak,jk})} \qquad (10)$$

waarin:
$i_{tak,jk,max}$: maximum stroom in tak van j naar k
$i_{tak,jk,min}$: minimum stroom in tak van j naar k
$i_{tak,jk,gem}$: gemiddelde stroom in tak van j naar k (berekend uit loadflow)
var($i_{tak,jk}$) : variantie van de stroom in tak van j naar k (berekend uit vergelijking 9)

Bovenstaande lichten we hieronder kort toe aan de hand van een rekenvoorbeeld.



Figuur 4 Rekenvoorbeeld aan een LS-net

Bovenstaande afbeelding geeft de topologie van het net weer. Voor het berekenen van de stromen en spanningen zijn de gegevens van netvoeding en kabels van belang.

<u>Netvoeding:</u>
Nominale spanning (U_{nom}): 0,4 kV
Nominale kortsluitstroom (I_k"): 10 kA
c-factor (uit IEC 909): 1
Weerstand (R_g): 0,002307 Ohm
Inductie (X_g): 0,022979 Ohm

Kabels:
Weerstand: 0,214 Ohm/km
Inductie: 0,079 Ohm/km

De gemiddelde waarden en de spreiding van de belastingen zijn hieronder gegeven. De spreiding is gelijk gesteld aan 10% van de gemiddelde waarde.

Tabel 1 Gemiddelde waarde en spreiding belasting

Knooppunt	Belasting	
	Gemiddelde (A)	**Spreiding (A)**
LS 11	50	5
LS 12	40	4
LS 13	60	6
LS 22	70	7

Voor de gemiddelde situatie worden alle stromen en spanningen met een loadflowberekening berekend. Hiervoor moeten van de belastingen de gemiddelde waarden uit bovenstaande tabel worden ingevoerd. Ook voor de traditionele maximale situatie kunnen de stromen en spanningen met een loadflowberekening worden berekend. De maximale waarden van de belastingen zijn hiervoor bepaald door de 2σ-grens (gemiddelde + 2σ). Onderstaande tabellen geven de loadflowresultaten voor de knooppuntspanningen en de stromen in de kabels weer voor de gemiddelde en voor de maximale situatie.

Tabel 2 Takstromen voor de situaties van gemiddelde belasting en van maximale belasting

Verbinding	Stroom (A) gemiddelde belasting	Stroom (A) maximale belasting
LS-rail - LS11	220	264
LS11 - LS12	100	120
LS12 - LS13	60	72
LS11 - LS22	70	84

Tabel 3 Knooppuntspanningen voor de situaties van gemiddelde belasting en van maximale belasting

Knooppunt	Spanning (V) gemiddelde belasting	Spanning (V) maximale belasting
LS-rail	394,04	392,85
LS11	385,69	382,82
LS12	381,90	378,26
LS13	379,62	375,53
LS22	383,04	379,63

Op grond van de traditionele berekening met maximale belasting, bepaald door de 2σ-grens, stijgt de stroom in de eerste kabel, van LS-rail naar LS11, met 44 A. De spanning daalt het meest aan het uiteinde van het net, op knooppunt LS13, met 4,09 V.

De spreidingen van de belastingen hebben hun invloed op de spreiding van de takstromen in het net en worden voor iedere belasting separaat berekend. Onderstaande tabel geeft de resulterende varianties van de takstromen weer.

Tabel 3 Varianties takstromen ten gevolge van spreiding belasting

Knooppunt	**Spreiding belasting (A)**	**varianties takstromen (A)**			
		LS-rail - LS 11	**LS 11 - LS 12**	**LS 12 - LS 13**	**LS 11 - LS 22**
LS 11	5	25	0	0	0
LS 12	4	16	16	0	0
LS 13	6	36	36	36	0
LS 22	7	49	0	0	49
Som van de varianties:		**126**	**52**	**36**	**49**

Volgens bovenstaand rekenvoorbeeld is de totale spreiding van de stroom van de tak van LS-rail naar LS 11 gelijk aan 11,2 (gelijk aan de wortel uit de totale variantie: 126). De maximale stroom in die tak is, wanneer de 2σ limiet wordt aangehouden, dan gelijk aan 220 + 2 x 11,2 = 242,2 A. Dat is ongeveer 22 A (10%) minder dan de waarde die gevonden zou worden uit de som van de individuele belastingsmaxima (gemiddelde + 2σ). Deze som is gelijk aan: 60 + 48 + 72 + 84 = 264 A (tabel 2). De winst door het toepassen van deze methode neemt vooral toe bij grotere aantallen onafhankelijke belastingen.

Voor de berekening van de spanningen in het netwerk wordt gebruik gemaakt van de IEC 909 berekening. Op alle belastingsknooppunten wordt achtereenvolgens een belastingstroom ter grootte van de spreiding geïnjecteerd (zie vergelijking 8). Vervolgens worden voor elke stroominjectie alle knooppuntspanningen in het net vastgesteld. Het kwadraat van de absolute waarde van een knooppuntspanning is gelijk aan de variantie van die spanning ten gevolge van de betreffende variantie van de belasting (zie vergelijking 7). Onderstaande tabel geeft de resulterende varianties van de knooppuntspanningen voor de spreidingen in de belastingen weer.

Tabel 4 Varianties knooppuntspanningen ten gevolge van spreiding belasting

Knooppunt	**Spreiding belasting (A)**	**varianties knooppuntspanningen (V)**				
		LS-rail	**LS 11**	**LS 12**	**LS 13**	**LS 22**
LS 11	5	0,040	0,114	0,114	0,114	0,114
LS 12	4	0,026	0,073	0,170	0,170	0,073
LS 13	6	0,058	0,164	0,382	0,713	0,164
LS 22	7	0,078	0,223	0,223	0,223	0,520
Som van de varianties:		**0,202**	**0,573**	**0,888**	**1,220**	**0,870**

Volgens bovenstaande tabel is de variantie het grootst voor knooppunt LS13, aan het uiteinde van het net. De spreiding is gelijk aan de wortel van de variantie: $\sigma = \sqrt{1,220} = 1,104$ V. Dat betekent dat uit de stochastische analyse volgt dat de maximale spanningsdaling, voorgesteld door de spanning in de gemiddelde situatie minus twee maal de spreiding (2σ-grens), gelijk is aan 379,62 - 2,208 = 377,41 V. Deze spanning is bijna 2 V beter dan de spanningsdaling bij maximale belasting, zoals op traditionele wijze berekend in de situatie van tabel 3. Volgens de stochastische benadering is de spanningsdaling voor deze situatie niet 4,09 V maar 2,21 V.

3.4 Stochastische verliezen

Voor het berekenen van de stochastische verliezen kunnen we een methode afleiden die grote overeenkomsten vertoont met de methode voor het berekenen van de varianties van de takstromen. Ten aanzien van de takverliezen bij twee onafhankelijke stochastische stroombronnen $\underline{i}_1$ en $\underline{i}_2$ geldt onderstaande:

$$
\begin{aligned}
P_{verlies} &= \underline{i}_{tot}{}^{2} \cdot R_{tak} \Rightarrow \\
E(P_{verlies}) &= E(\underline{i}_{tot}{}^{2}) \cdot R_{tak} \\
&= E((\underline{i}_{1} + \underline{i}_{2})^{2}) \cdot R_{tak} \\
&= E((\bar{i}_{1} + \hat{i}_{1} + \bar{i}_{2} + \hat{i}_{2})^{2}) \cdot R_{tak}
\end{aligned}
\qquad (11)
$$

Wanneer we de stochastische totaalstroom opsplitsen in de deterministische en de stochastische component, kan de verliesvergelijking voor de totaalstroom ook geschreven worden als:

$$
\begin{aligned}
E(P_{verlies}) &= E((\bar{i}_{tot} + \hat{i}_{tot})^{2}) \cdot R_{tak} \\
&= E(\bar{i}_{tot}{}^{2} + 2 \cdot \bar{i}_{tot} \cdot \hat{i}_{tot} + \hat{i}_{tot}{}^{2}) \cdot R_{tak} \\
&= \left(E(\bar{i}_{tot}{}^{2}) + E(2 \cdot \bar{i}_{tot} \cdot \hat{i}_{tot}) + E(\hat{i}_{tot}{}^{2})\right) \cdot R_{tak} \\
&= \left(E(\bar{i}_{tot}{}^{2}) + 2 \cdot \bar{i}_{tot} \cdot E(\hat{i}_{tot}) + \operatorname{var}(\hat{i}_{tot}) + (E(\hat{i}_{tot}))^{2}\right) \cdot R_{tak} \\
&= \left(E(\bar{i}_{tot}{}^{2}) + 0 + \operatorname{var}(\hat{i}_{tot}) + 0\right) \cdot R_{tak} \\
&= \left(E(\bar{i}_{tot}{}^{2}) + \operatorname{var}(\hat{i}_{1}) + \operatorname{var}(\hat{i}_{2}) + 2\operatorname{cov}(\hat{i}_{1}, \hat{i}_{2})\right) \cdot R_{tak}
\end{aligned}
\qquad (12)
$$

In bovenstaande vergelijkingen is de verwachting van de stochastische component gelijk aan nul. Het gemiddelde verlies is dus bepaald door de som van de gemiddelde kwadratische stroomwaarde, de varianties en de covariantie. Bij onafhankelijke stochastische stroombronnen valt de laatste term weg. Het stochastische verlies wordt dan berekend door injectie van de standaarddeviaties van de onafhankelijke stroombronnen. Daarna kan door superpositie van varianties van de knooppuntspanningen de totale variantie van de knooppuntspanningen worden bepaald. De extra verliezen door de varianties over de takken in het netwerk zijn daarmee lineair.

3.5 Structuurschema

De methode is met de huidige technieken eenvoudig te implementeren in bestaande rekenprogramma's. Door implementatie in een combinatie van een loadflow- en kortsluitstroom berekeningsprogramma is deze methode geschikt voor alle radiale en vermaasde elektriciteitsnetten.

Indien de belastingen als stochastisch onafhankelijk worden gezien, hoeft geen rekening gehouden te worden met de correlatie. Aangezien over de stochastische modellering nog geen praktijkkennis voorhanden is, bevelen we aan om de correlatie voorlopig nog buiten beeld te laten.

Voor alle belastingen i:

- Bepaal $\bar{i}_i := E(\underline{i}_i)$
- Bepaal $\sigma_{i_i} := \sqrt{\operatorname{var}(\underline{i}_i)}$

Stel alle belastingen gelijk aan hun gemiddelde waarden $\bar{i}_i$

Bereken gemiddelde loadflow met behulp van de standaard loadflowberekening

Bewaar alle takstromen $i_{tak,jk,gem}$

Bewaar alle knooppuntspanningen $u_{k,gem}$

Maak het netwerk passief (stel alle spanningsbronnen gelijk aan nul)

Voor alle belastingen i:

- Maak alle stroombronnen gelijk aan nul
- Bepaal injectiestroom aan de hand van standaarddeviatie: $i_{inj,i} := \sigma_i$
- Injecteer $i_{inj,i}$ op de plaats van belasting i
- Bereken alle takstromen i_{jk} volgens IEC909
- Bereken alle bijbehorende spanningen u_k uit $\underline{U} = [Y]^{-1}\,\underline{I}$ (Procedure BerekenIECSpanningen)
- Voor alle takken *jk*: bereken $var(i_{jk}) := |i_{jk}|^2$
- Bewaar alle varianties takstromen
- Voor alle knooppunten *k*: bereken $var(u_k) := |u_k|^2$
- Bewaar alle varianties knooppuntspanningen

Voor alle injecties i:

- Bepaal: $\operatorname{var}(\underline{i_{tak,jk}}) = \sum_{i=1}^{N} \operatorname{var}(\underline{i_{tak,jk}}_{,i})$
- Bepaal: $\operatorname{var}(\underline{u_{knooppunt,k}}) = \sum_{i=1}^{N} \operatorname{var}(\underline{u_{knooppunt,k}}_{,i})$

Voor alle takken jk:

- Bepaal maximum stroombelasting: $i_{tak,jk,\max} = i_{tak,jk,gem} + 2 \cdot \sqrt{\operatorname{var}(i_{tak,jk})}$
- Bepaal minimum stroombelasting: $i_{tak,jk,\min} = i_{tak,jk,gem} - 2 \cdot \sqrt{\operatorname{var}(i_{tak,jk})}$

Voor alle knooppunten k:

- Bepaal maximum knooppuntspanning: $u_{knooppunt,k,\max} = u_{knooppunt,k,gem} + 2 \cdot \sqrt{\operatorname{var}(u_{knooppunt,k})}$
- Bepaal minimum knooppuntspanning: $u_{knooppunt,k,\max} = u_{knooppunt,k,gem} - 2 \cdot \sqrt{\operatorname{var}(u_{knooppunt,k})}$

4 CONCLUSIE

De methode van rekenen met stochastische stromen en spanningen, als gevolg van de introductie van stochastische belastingen, is in dit onderzoek mathematisch onderbouwd.

De methode is met de huidige technieken eenvoudig te implementeren in bestaande rekenprogramma's. Aanbevolen wordt, in verband met de nieuwheid, de belastingen voorlopig als stochastisch onafhankelijk te beschouwen.

De methode is geschikt voor het rekenen aan alle soorten radiale en vermaasde elektriciteitsnetten en geeft een reëler beeld van de stroomverdeling in een elektriciteitsnet dan alleen het rekenen met maximale belastingwaarden. De traditionele methode, die werkt met gelijktijdige maxima, geeft een wordt case resultaat van stromen en spanningen. In een rekenvoorbeeld is aangetoond dat de maximale stroombelasting van kabels en grootste spanningsdaling van knooppunten veel minder ernstig kan zijn dan wanneer met gelijktijdige maxima gerekend wordt. De met behulp van de stochastische methode berekende stromen en spanningen zijn reëler dan de waarden die met de traditionele manier berekend worden.

LITERATUUR

EnergieNed, 1996: EnergieNed: "Elektriciteitsdistributienetten", Kluwer Techniek, 1996

Phase to Phase, 2001: P.M. van Oirsouw: "Stochastische loadflow, beschrijving model belasting", Phase to Phase rapport nummer 01 195 pmo, 7 september 2001

BIJLAGE: THEORIE STOCHASTISCHE SIGNALEN

Een stochastische variabele wordt aangegeven met behulp van een onderstreping. Een specifieke waarde, die de stochastische variabele kan aannemen, wordt aangegeven met behulp van een index.

$\underline{x}$: stochastische variabele

x_i : specifieke waarde van $\underline{x}$

In het vervolg gaan we ervan uit dat de kansen van optreden van de individuele waarden van $\underline{x}$ gelijk zijn. De verwachting van $\underline{x}$ is dan gelijk aan de gemiddelde waarde en wordt gegeven door:

$$E\underline{x} = \mu_x = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i$$

De variantie is gedefinieerd als de verwachting van het kwadraat van de afwijking ten opzichte van het gemiddelde en wordt gegeven door:

$$\mathrm{var}(\underline{x}) = E(\underline{x} - \mu_x)^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \mu_x)^2$$

De spreiding, ook wel standaardafwijking of standaarddeviatie genoemd, is gedefinieerd als de wortel van de variantie:

$$\sigma_x = \sqrt{\mathrm{var}(\underline{x})}$$

De covariantie van twee stochastische variabelen is gedefinieerd als de verwachting van het product van de afwijkingen ten opzichte van hun respectievelijke gemiddelden:

$$\mathrm{cov}(\underline{x}_1, \underline{x}_2) = E(\underline{x}_1 - \mu_{x1})(\underline{x}_2 - \mu_{x2})$$

Aan de hand van de definities zijn onderstaande rekenregels af te leiden:

$$E(a\underline{x} + b) = aE(\underline{x}) + b$$

$$E(g(\underline{x}) + h(\underline{x})) = E(g(\underline{x})) + E(h(\underline{x}))$$

$$\mathrm{var}(\underline{x}) = E(\underline{x}^2) - (E(\underline{x}))^2$$