



**Peter van Oirsouw** is momenteel werkzaam bij KEMA Procesautomatisering & Informatietechnologie (PCL) te Arnhem als consultant op het gebied van netanalyse technieken.

## Rekenen op aarde

### • SUMMARY

LOW VOLTAGE NETWORK SAFETY IS A HOT ISSUE IN THE NETHERLANDS. ALTERNATIVE GROUNDING PRINCIPLES BECOME POPULAR. ALTERNATIVES, HOWEVER, MOSTLY ARE MORE CALCULATION INTENSIVE. KEMA HAS DEVELOPED THE COMPUTER PROGRAM GAIA FOR SAFETY GROUNDING ANALYSIS. GAIA IS TUNED TO THE DAILY PRAXIS OF LV-ELECTRICITY NETWORK PLANNERS AND WILL GROW TO AN INTEGRAL LV PLANNING PACKAGE.

ningen de veilige aardingsvoorziening voor de klant aan kunnen tonen. Tevens streven we besparingen na op het gebied van scherper en efficiënter dimensioneren. Het project heeft geresulteerd in het computerprogramma GAIA voor berekeningen aan aardingsvoorzieningen.

### Rekenen aan aarde

In Nederland worden voornamelijk twee soorten aarding toegepast: TT en TN. Bij toepassing van het TT-stelsel wordt de aarding bij de klant ter plekke verzorgd (via waterleiding of aardelektrode). Bij toepassing van het TN-stelsel wordt de aarding door het distributiebedrijf via het net aangeboden.

TT en TN hebben beide voor- en nadelen. Een belangrijk aspect bij TN is dat aan de netten meer gerekend moet worden. TN is vooral complexer wanneer de retourweg vermaasd is. Er moeten veel meer vragen worden beantwoord:

- hoe groot zijn foutspanning en foutstroom?
- hoe moet het net worden gedimensioneerd zodat bij kortsluiting altijd een veilige situatie voor de gebruiker blijft bestaan?
- er is geen standaardoplossing voor de aardverbindingen; welke is voor specifieke gevallen de beste?
- welke oplossing vraagt de laagste investering?

De problematiek concentreert zich op het handhaven van de veilige situatie voor de gebruiker, ook tijdens storingen. De randwaarde hierbij is dat we niet meer dan nodig gaan dimensioneren, zodat de investeringen voor de infrastructuur niet te hoog zijn. Het is belangrijk dat een rekenmethode wordt toegepast die algemeen geaccepteerd is. Daarom zijn vertegenwoordigers van distributiebureaus betrokken bij het ontwikkelen ervan. Het doel is de aardingsvoorzieningen op een duidelijke wijze te ontwerpen, zodat de veiligheid aantoonbaar is. Bij het ontwerp is zoveel mogelijk uitgegaan van bestaande normen en technieken. Belangrijkste uitgangspunt is de norm IEC 479 met de bijbehorende aanbevelingen.

In de norm is beschreven hoe we om moeten gaan met kritische situaties, die bij storingen in het net voor kunnen komen. Kritische situaties kunnen ontstaan in het geval van een kortsluiting tussen fase en nul of aarde. Hierbij kennen we foutstroom en foutspanning. De foutspanning is de spanning op de

Hoe is het gesteld met de veiligheid van de klanten van het elektriciteitsbedrijf? Wie is daar uiteindelijk verantwoordelijk voor? Terwijl juristen deze vragen trachten te beantwoorden, wapenen de technici zich om in de steeds voorkomende twijfelgevallen uitspraak te kunnen doen over de mate waarin aan de normen en standaards is voldaan.

Het wegvallen van de traditionele wijze van aarding is een belangrijke hedendaagse ontwikkeling. Waterleidingbedrijven gaan bij renovatie over op kunststof en informeren hun klanten dat zij voortaan zelf maar voor een aardingsvoorziening moeten zorgen. Met de wetenschap dat veel eindgebruikers dit advies niet begrijpen, besluiten sommige distributiebedrijven om zelf veilige aarding aan te bieden en stappen over op het zogenaamde TN-stelsel (zie kader) voor aardingsvoorziening. Zij hebben hierbij het thema 'kwaliteit van de dienstverlening' in gedachte.

Bij TT-aarding (zie kader) is een duidelijke scheiding aanwezig van de verantwoordelijkheden. Bij toepassing van TN is het distributiebedrijf verantwoordelijk voor de veiligheid. Door juiste toepassing van het TN-systeem en door regelmatige inspecties zijn de risico's minimaal. Met een goede berekening kunnen we de veiligheid aantonen. Vuistregels zijn hierbij minder goed toepasbaar en leiden tot te grote marges. Er bestaat behoefte aan in praktijk bruikbare gereedschappen waarmee we op eenduidige en doelmatige wijze aan veiligheidsaarding kunnen rekenen.

KEMA heeft deze problematiek aangepakt in het project "Technisch-/economische evaluatie van veiligheidsaarding". Doelstelling van dit project was het ontwikkelen van een gereedschap voor het eenvoudig vergelijken van meerdere ontwerpvarianten. Bovendien willen we met het gereedschap door bereke-

### Wat is dat, TT en TN?

Veilige aarde zorgt ervoor dat metalen delen van op het net aangesloten apparaten onder alle omstandigheden veilig zijn om aan te raken. Dat betekent dat de apparatuur onder gewone gebruiksomstandigheden niet onder spanning mag staan. Hierom is een goede aardingsvoorziening nodig. De aardingsvoorziening wordt in Nederland op twee manieren uitgevoerd: volgens het TT- of volgens het TN-stelsel.

TT staat voor Terra-Terra en wil zeggen dat de aardingsvoorziening van de (huis)installatie bij de gebruiker zelf door een elektrode of waterleiding wordt geaard. Het is belangrijk dat de impedantie (aardverspreidingsweerstand) klein is.

TN staat voor Terra-Neutral en wil zeggen dat de aardingsvoorziening van de (huis)installatie wordt aangesloten op de nulleider van de distributiekabel. Het is belangrijk dat de nul dezelfde potentiaal heeft als de lokale aarde van de gebruiker. Dit wordt bereikt door zoveel mogelijk koppelingen te maken.

nul ten opzichte van de "echte aarde", ter plekke van de foutplaats. De gebruiker kan kortstondig in aanraking komen met die foutspanning indien de aardingsvoorziening van het apparaat dat hij aanraakt in verbinding staat met de foutplaats. Vooral indien nul en aarde gekoppeld zijn, kan de aardingsvoorziening een spanning voeren. De spanning die de gebruiker hierdoor ervaart ten opzichte van zijn eigen aarde (via schoeisel en aardverspreidingsweerstand) noemen we de aanraakspanning.

Twee soorten fouten zijn de voornaamste oorzaak van het kortstondig onder spanning staan van de aardingsvoorziening:

- fouten in de woning
- fouten in het distributienet.

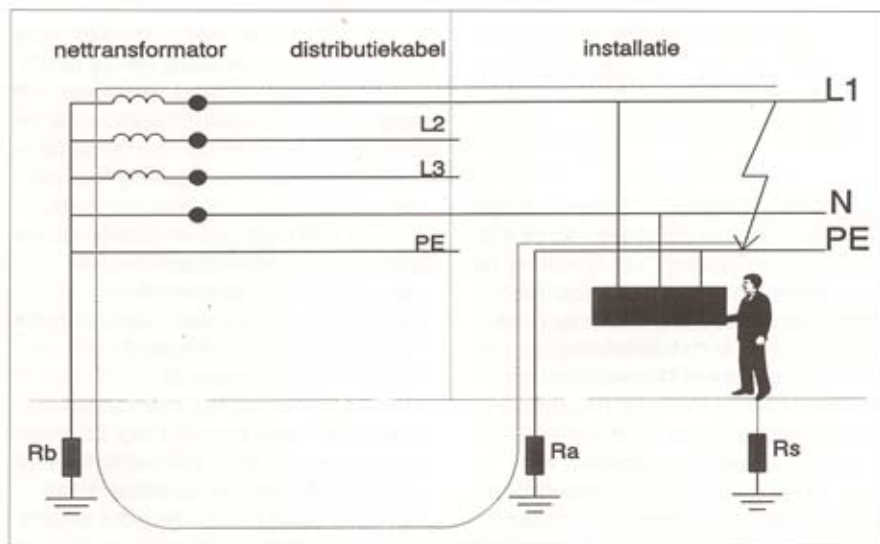
De hoogte van de foutspanning wordt voornamelijk bepaald door de impedanties van heen- en retourcircuit en van de aardverspreidingsweerstand. De hoogte van de aanraakspanning in combinatie met de duur van de fout bepaalt de mate van veiligheid. Belangrijk aspect hierbij zijn de keuzes ten aanzien van beveiliging, kabels en lokaties van de netstations. Ook lange verbindingen en de mogelijkheid om tweezijdig te voeden vereisen extra aandacht.

#### Fout in de woning

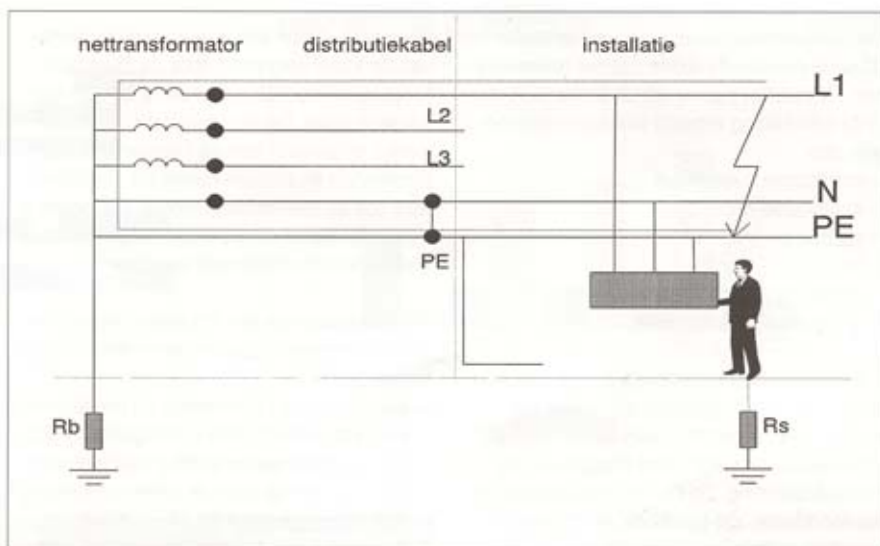
Figuren 1 en 2 geven schematisch het circuit weer bij een fout in een woning in de gevallen dat een TT- respectievelijk een TN-stelsel is toegepast. We zien dat bij toepassing van het TT-stelsel de aardingsvoorziening in de woning zelf (aardverspreidingsweerstand,  $R_a$ ) een belangrijke rol speelt. En zo belanden we bij de actualiteit: problemen kunnen ontstaan bij het wegvallen van de traditionele aarding, in veel gevallen via het waterleidingnet. Indien het waterleidingbedrijf besluit bij renovatie op kunststof over te gaan, zou dit onmiddellijk met het elektriciteitsbedrijf afgestemd moeten worden, aangezien anders door vermindering van de aarding onveilige situaties kunnen ontstaan. Bij toepassing van het TN-stelsel (figuur 2) speelt de impedantie van het retourcircuit, beheerd door het distributiebedrijf, een belangrijke rol voor de hoogte van de aanraakspanning. De veiligheid voor een mens wordt mede bepaald door de hoogte van de aanraakspanning, de weerstand van mens en de aardverspreiding ( $R_s$ ).

#### Fout in het distributienet

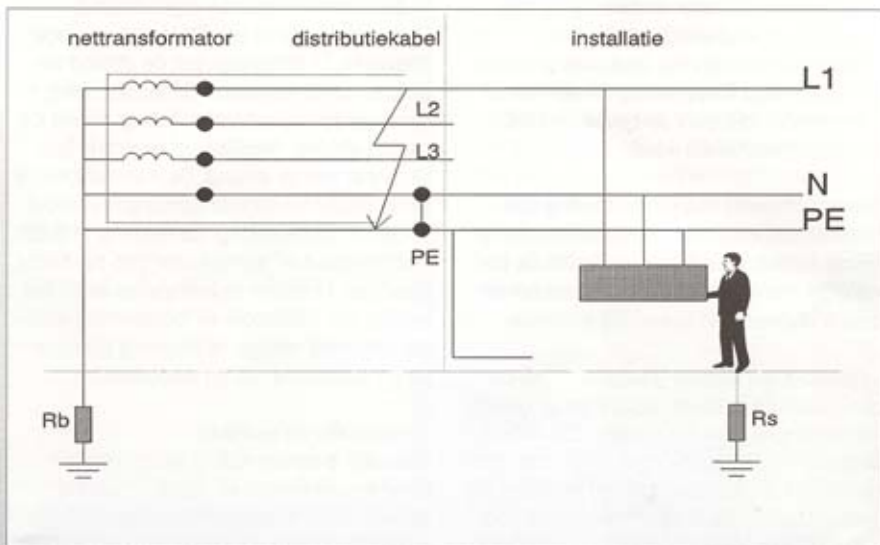
Figuur 1 illustreert dat een fout in het net-



Figuur 1. TT-stelsel: fout in woning.



Figuur 2. TN-stelsel: fout in woning.



Figuur 3. TN-stelsel: fout in distributienet.



werk, in het geval dat een TT-stelsel is toegepast, geen consequenties heeft voor de aanraakspanning op toestellen in de woning. De nul en aarde van de distributiekabel staan immers niet in verbinding met de aardingsvoorziening (PE) in de huisinstallatie. Figuur 3 illustreert dat bij een TN-stelsel een fout in het netwerk een spanning op de aardleiding introduceert. De hoogte wordt bepaald door de verhouding van de impedanties van heen- en retourweg. Om de impedantie van de retourweg zo laag mogelijk te houden, wordt zoveel mogelijk vermaasd en tussen nul en aarde gekoppeld. Hierbij tekenen we aan dat in het geval van het TN-stelsel en door vermazing van nul- en aardgeleiders de retourimpedantie vaak lastig vast te stellen is. Dit is nu precies de reden dat het rekenwerk aan TN-netten zo complex is! Elementen die in de berekening moeten worden meegenomen zijn:

- impedantie heencircuit
- impedantie retourcircuit
- gedrag beveiliging
- impedantie mens
- aardverspreidingsweerstand
- stroom-tijd gevarencurve.

Wat bovendien het beoordelen van de veiligheid van aardingsystemen zo complex maakt, is het verband tussen foutstroom, afschakelduur en toegestane hoogte van de aanraakspanning. Zo kan het paradoxale geval voorkomen dat een hoge aanraakspanning wel veilig is en een lage niet:

- hoge aanraakspanning gaat vaak gepaard met een hoge foutsparing en een grote foutstroom, die door de beveiliging snel genoeg afgeschakeld wordt
- lage aanraakspanning gaat vaak gepaard met een lage foutsparing en een kleine foutstroom, die door de beveiliging (te) traag afgeschakeld wordt.

Het afschakelen van een kortsluiting is afhankelijk van foutplaats, kortsluitstroom en zekering. Belangrijk is dus de keuze van de beveiliging. Het afschakelgedrag van de beveiliging is vastgelegd in stroom/tijd-krommen.

De veiligheid voor de gebruiker wordt bepaald door de duur van de fout en de grootte van de stroom door het lichaam. De verhouding van de toegestane duur en grootte van de aanraakstroom is vastgelegd in stroom-tijd gevarencurves. Deze krommen leggen voor een bepaalde mate van gevaar het verband vast tussen grootte en duur van de stroom

door het lichaam. Het gevaar van elektrocutie bestaat uit ernstige verstoring van het hartritme, waardoor geen bloedcirculatie meer plaatsvindt (hartfibrillatie). Dit heeft zonder ingrijpen de dood tot gevolg. Ook de manier waarop een mens onder spanning staande delen aanraakt is in grote mate bepalend. Het distributiebedrijf staat ten aanzien van de berekening voor onderstaande keuzes:

- welke stroom-tijd gevarencurve?
  - welke wijze van aanraken (gevolgen voor impedantie menselijk lichaam)?
  - welke schoeiselweerstand?
  - welke aardverspreidingsweerstand?
- Deze keuze is sterk bepalend voor de beoordeling van de veiligheid. Het distributiebedrijf maakt op concernniveau de keuze en laat alle berekeningen binnen het bedrijf volgens deze bedrijfseigen standaard uitvoeren.

#### *Bepalen van de maximale lengte van een distributiekabel*

Bij een TT-stelsel wordt de maximale lengte van de kabel begrensd door de maximaal toegestane afschakelduur uit de stroom-tijd gevarencurve. De aanraakspanning is nauwelijks afhankelijk van de kabellengte. Door afnemende foutstroom neemt de afschakelduur toe bij toenemende lengte. De lengte is maximaal indien de werkelijke afschakelduur gelijk is aan de maximaal toegestane.

In het geval van een TN-stelsel moeten we eerst de soorten fouten onderkennen. Foutsituaties bij TN zijn:

- een fout in de LS-installatie bij de gebruiker kent een relatief grote kortsluitstroom door een laagohmige verbinding met sterpunt; deze fout wordt door de eigen beveiliging zeer snel afgeschakeld
- een fout in de LS-hoofdkabel vlak bij de huisaansluiting leidt tot een relatief geringe kortsluitstroom, die door de beveiliging bij de bron moet worden afgeschakeld.

De foutsparing bij een TN-stelsel is in tegenstelling tot TT afhankelijk van de afstand van de bron tot de foutsituatie. De foutsparing, en daarmee ook de aanraakspanning, neemt toe met de afstand. Tegelijkertijd neemt de foutstroom af met de afstand. De maximale lengte wordt begrensd door de combinatie van foutstroom en foutsparing. De hieruit af te leiden afschakelduur en aanraakspanning zijn hierbij bepalend. Moeilijker te voorspellen wordt het gedrag van foutstroom en foutsparing indien het retourpad bestaat uit onderling gekoppelde en vermaasde nul- en aardgeleiders.

#### *Bepalen van de veiligheid*

Wanneer is de aansluiting veilig? Het verband tussen grootte en tijdsduur van de stroom door het menselijk lichaam wordt gegeven door de in de norm beschreven stroom-tijd gevarencurves. Essentieel is dat

de kortsluiting snel moet worden afgeschakeld. Een kortsluiting leidt tot een foutsparing. Hieruit kunnen we aanraakspanning en bijbehorende maximaal toelaatbare tijd afleiden volgens de stroom-tijd gevarencurve. De kortsluitstroom door de beveiliging leidt tot afschakeling door de beveiliging binnen de karakteristieke tijd. De aansluiting is veilig als de uitschakeltijd kleiner is dan de maximaal toegestane tijd. We onderscheiden de volgende drie gevallen:

- 1 aanraakspanning te hoog en kortsluiting wordt op tijd afgeschakeld: situatie is veilig
- 2 aanraakspanning te hoog en kortsluiting wordt te laat of niet afgeschakeld: situatie is onveilig
- 3 aanraakspanning laag genoeg: situatie is veilig.

In het geval van een onveilige situatie is de remedie een andere beveiliging, een ander retourpad of een kortere distributiekabel. In het geval dat de aanraakspanning laag genoeg is, kan het voorkomen dat de beveiliging door te lage kortsluitstroom niet afschakelt. Deze situatie is weliswaar veilig maar ongewenst voor het distributienet.

Voor verbetering van veiligheid en betrouwbaarheid van de aardingsvoorziening zijn aanbevelingen door EnergieNed gedaan.

Van belang voor bovenstaande problematiek is onder andere:

- het retourcircuit moet tenminste twee paden bevatten
  - koppelen nulleider en aardscherm in elke aansluitmof en aansluitkast
  - vermazen nul- en aardleiders
- hanteer een maximum voor de lengte van de LS-hoofdkabel
- aanbrengen van hulpaarding.

#### *GAIA*

Om aan bovenstaande problematiek te kunnen rekenen is door KEMA het computerprogramma met de naam GAIA, Grieks voor "aarde", ontwikkeld. GAIA is een in de praktijk bruikbaar gereedschap, waarmee we op eenduidige en doelmatige wijze de veiligheidsaarding kunnen evalueren. De mogelijkheid om ontwerpvarianten te vergelijken verschaft ons beter inzicht in de complexe aardingsproblematiek. De ontwikkeling is begeleid door medewerkers van de distributiebedrijven, zodat het resultaat is toegesneden op hun specifieke problematiek.

Het programma bestaat uit een rekenhart en een componenten database, onderling gekoppeld en bestuurd met een grafische schil. De grafische schil heeft een vergelijkbare structuur en werking als het programma Vision voor netanalyse. Het programma berekent en evalueert de gevolgen van fouten op

# 4. Het draaiwerk, wij de kabels.

alle knooppunten in het LS-net. Bij de berekening wordt uitgegaan van het volledige model van de LS-kabel: drie aders, nulleder en aardscherm. De elektrotechnische koppelingen tussen de geleiders onderling wordt in de modellering meegenomen.

## Toepassing in de praktijk

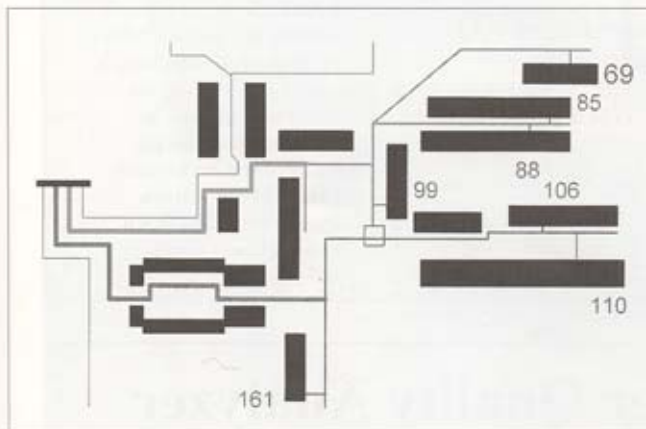
Bij het evalueren van de aardingsvoorziening van een netontwerp volgens het TN-stelsel volstaat het dat we ons concentreren op de verre punten en de lange leidingen. Deze punten hebben het grootste risico van aardingsonveiligheid. Figuur 4 illustreert het LS-netontwerp voor een nieuwbouwproject. Aan de hand van het stratenplan kunnen we de verre punten eenvoudig herleiden. Bij een geautomatiseerd ontwerpproces kunnen de verre punten en lange aansluitingen volgens een algoritme bepaald worden. Figuur 5 illus-

treert het hieruit afgeleide schema. Hierin zien we dat de planner zich concentreert op een enkele verre kabel en de weg er naar toe. De aansluitingen W\_106, W\_110 en de eindsluiting 1\_e2 worden beschouwd als de meest verwijderde punten. De resultaten van de berekening kunnen in het schema op globaal en op detail niveau worden bekeken. Ook kunnen we de resultaten als histogram bekijken. Dit is afgebeeld in figuur 6. De uitschakeltijd neemt van W\_106, via W\_110 tot 1\_e2 gestaag toe. Elke linkerbalk geeft de berekende aanraakspanning weer. Elke rechterbalk geeft de berekende (werkelijke) afschakeltijd weer. Voor de drie genoemde punten is de afschakeltijd te groot. In dit geval zou de remedie kunnen bestaan uit een snellere beveiliging of verlaging van de impedantie van de retourweg.

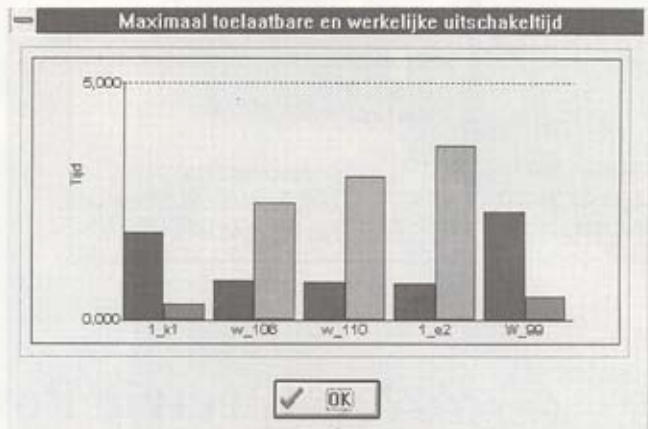
## Conclusie en toekomstige ontwikkelingen

In het project 'Technisch-/economische evaluatie van veiligheidsaarding' is het computerprogramma GAIA ontwikkeld. Met GAIA kunnen de aardingsvoorzieningen op eenduidige wijze worden ontworpen, zodat de veiligheid aantoonbaar is. Een gedetailleerd model van het distributienet ligt eraan ten grondslag. Bij het ontwerp is zoveel mogelijk uitgegaan van bestaande normen en technieken. Belangrijkste uitgangspunt is de norm IEC 479 met de bijbehorende aanbevelingen.

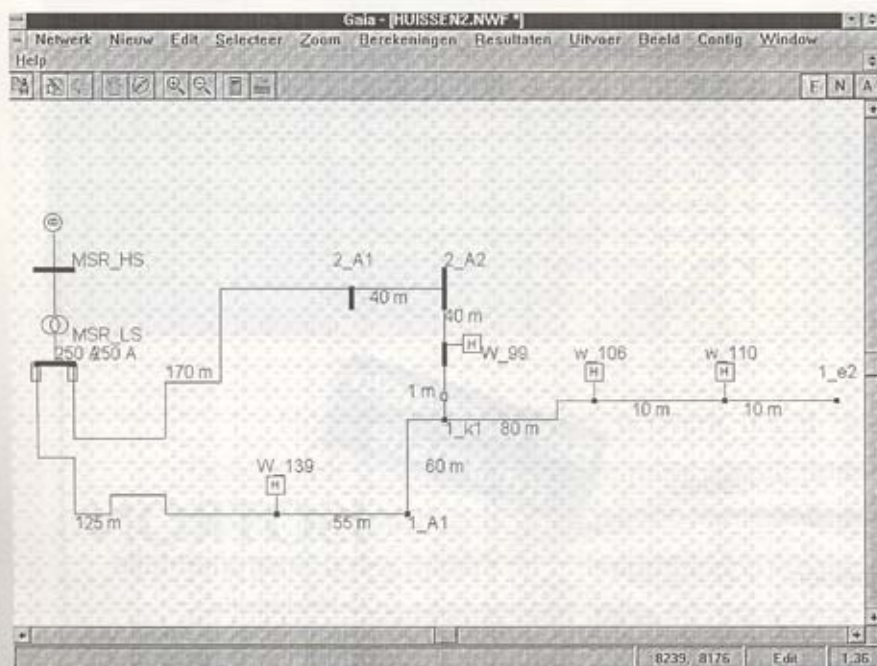
Het ontwerpen van een LS-distributienet is een proces waarbij moet worden voldaan aan technische en economische criteria. Technische criteria hebben betrekking op spanningshuishouding, belasting van componenten en de veiligheid van gebruikers bij



Figuur 4. Woningblokken met distributienet.



Figuur 6



Figuur 5. Schematische weergave distributienet.

kortsluitingen in het net. Economische criteria moeten leiden tot een netontwerp met de laagste kosten. Ook de hogere benutting van het LS-distributienet en daarin voorkomende decentrale opwekking maakt dat berekeningen noodzakelijk worden.

In een vervolgproject wordt GAIA uitgebreid tot een integraal programma voor analyse en ontwerp van LS-distributienetten. Voor een efficiënte werkwijze en betere acceptatie in de praktijk wordt GAIA aangevuld met een functie voor het economisch optimaal LS-ontwerp, rekening houdend met de belangrijkste technische randvoorwaarden.

## DANKWOORD

DE AUTEUR IS VEEL DANK VERSCHULDIGD AAN DE HEREN A. PROEM (EDON) EN F. PROVOOST (NUON) VOOR HUN WAARDEVOLLE INBRENG IN HET PROJECT.