Hoofdstuk 3

Funky feedback: lastige vervormingen in het stroomnet

Hoog- en laagfrequente vervormingen in het stroomnet komen vaker voor door de opkomst van windparken en zonnestroom. De vervormingen zijn een belemmering voor de overgang naar duurzame energie. Het energiekennisbedrijf DNV GL vroeg de wiskundigen van de Studiegroep Wiskunde met de Industrie mee te denken over omvormers, die beter met deze vervormingen overweg kunnen.

Ons energiesysteem verandert door de opkomst van hernieuwbare energie. Vroeger was het elektriciteitsnet éénrichtingverkeer - van de centrale naar de consument. Door de komst van zonnepanelen, windparken en andere energiebronnen verandert dat in een decentraal netwerk met meerdere bronnen. Die extra bronnen zorgen voor extra oscillaties in het net. Dat stelt nieuwe eisen aan de vermogenselektronica in het elektriciteitsnet. "Zowel de laag- als de hoogfrequente oscillaties verstoren het net", vertelt senior onderzoeker Yin Sun van DNV GL, gespecialiseerd in vermogenselektronica. "Voor de laagfrequente vervormingen zijn al filters geïnstalleerd. De hoogfrequente oscillaties - zogeheten harmonischen - verspreiden zich nog door het systeem."

DNV GL is een energiekennisbedrijf, van advies en beleid tot certificering en uitvoering, dat wereldwijd 16.000 werknemers heeft. DNV GL heeft in 2011 het Nederlandse KEMA overgenomen, dat elektronica test en consultancywerk doet. Sun werkt bij de onderzoeksafdeling in Arnhem, waar hij onder meer bezig is met hoogfrequente vervormingen. Sun: "Wereldwijd loopt er veel onderzoek naar oscillaties boven de 50 hertz, omdat ze voor iedereen een probleem zijn." De hoogfrequente harmonische oscillaties zorgen voor energieverlies, oververhitting en schade. Sun vraagt de Studiegroep advies over een regelaar in een gelijkstroomomvormer. "Zou je een regelaar voor vermogenselektronica kunnen maken die het hele frequentiegebied aankan?"

Figuur 3.1: Foto DNV GL

Even naar de basis. Een omvormer is een apparaat, dat spanning omzet van het ene voltage in het andere. Denk aan de omvormer bij zonnepanelen, die de gelijkstroom uit de panelen omzet naar een nette 230V-wisselstroom die het elektriciteitsnet in kan. De buck converter die Sun presenteerde tijdens de studiegroep, is een omvormer die gelijkstroom van het ene voltage efficiënt omzet in een ander voltage. Dat gebeurt met behulp van een snelle schakelaar, die de inkomende stroom soms wel doorlaat, en soms niet. "Het is belangrijk dat het uitgaande voltage op gelijk niveau blijft, ook als de weerstand in het aangesloten netwerk fluctueert", legt Sun uit. In de praktijk betekent dat er voortdurend wordt bijgestuurd: zodra het uitgaande voltage afwijkt van het gewenste voltage wordt er met hulp van de schakelaar meer of minder stroom 'doorgelaten', om het gewenste voltage zo snel mogelijk weer op niveau te krijgen. "Maar gaat dat corrigeren te snel, dan bestaat de kans dat het systeem instabiel wordt", legt Sun uit. "Het is dus de uitdaging is om zo snel mogelijk corrigeren, zonder instabiliteiten."

Hij gaf de leden van de Studiegroep een eerste, lineaire oplossing voor een vereenvoudigde vorm van het systeem: een regelfunctie D waarmee wordt berekend, wanneer en hoe lang de schakelaar aan en uit moet om het voltage op niveau te krijgen. De tijd dat de schakelaar 'aan' staat, hangt dan af van twee factoren. De eerste factor is het verschil tussen het daadwerkelijke voltage en het gewenste voltage in het systeem, de tweede is de tijdsafgeleide van het daadwerkelijke voltage. Deze twee samen zorgen ervoor dat de controller het voltage terugbrengt naar het gewenste voltage.

$$D = k_1(V_o^* - V_o) + k_2 \frac{dV_o}{dt} + k_3 \tag{3.1}$$

Regelfunctie D. V_o^* is het gewenste voltage, V_o het uitgaande voltage. Doel van de regelfunctie is om te zorgen dat V_o zo snel mogelijk naar het gewenste voltage V_o gaat.

Sun: "Deze aanpak werkt redelijk, maar soms treden er instabiliteiten op. Mijn vraag aan de Studiegroep was om een controller te bedenken, die beter is dan die van mij. Dat moest te doen zijn, omdat mijn aanpak een vrij eenvoudige is."

Met die vraag gingen de wiskundigen aan de slag. Vivi Rottschäfer, universitair hoofddocent aan de Universiteit Leiden, was een van hen. Zij weet veel van wiskunde, maar weinig van elektronica. “Ik zat zo naar dat schema te kijken, met die weerstanden en spoelen, maar dat is niet mijn taal. We moesten eerst duidelijk krijgen wat precies de vraag was.” Na uitleg van Sun kwam de groep op een analogie van een jacht. Aan boord zijn allerlei elektrische apparaten, en op het dak liggen zonnepanelen die voor stroom zorgen. De opbrengst van de panelen varieert door de tijd. Ook de vraag fluctueert, doordat je bijvoorbeeld je mobiele telefoon op gaat laden. Wanneer je die inprikt, zorgt deze extra belasting voor een acute vervorming in je netwerk. De regelaar moet daar zo snel mogelijk op reageren, en het voltage weer netjes op niveau brengen. Rottschäfer: “Die analogie hielp ons om beter te begrijpen waar we precies aan werkten. Daarna gingen we met de bijbehorende vergelijkingen aan de slag.” En daarmee waren de wiskundigen weer op vertrouwd gebied.

Eerst onderzocht de groep hoe het kwam dat het systeem met deze regelfunctie soms instabiel wordt. Rottschäfer: ”In simulaties zagen we dat het soms na relatief lange tijd nog mis gaat. Dan keert het voltage de eerste milliseconden netjes terug naar de gewenste waarde, maar daarna zakt de spanning helemaal in. De regelaar moet dan weer vol aan om dat weer goed te krijgen. Dat kwam door de tweede term in de regelfunctie, de tijdsafgeleide van het voltage. Die zorgt soms voor gedonder. Die afgeleide kan soms behoorlijk groot worden, waardoor je er weer bij je gewenste waarde vandaan schiet.”

De wiskundigen gingen dus op zoek naar een schakelfunctie, waarbij het systeem zonder dit soort bokkensprongen convergeert. Rottschäfer: “Wat hebben we nodig, vroegen we ons af? Een schakelaar die snel reageert: een groot spanningsverschil moet hij ook met grote stappen corrigeren. Maar eenmaal in de buurt van de gewenste spanning moet hij voorzichtiger worden, zodat er geen rare dingen gebeuren. Dan moet hij kleinere correcties uitvoeren.” Zie hier het recept voor een goede regelfunctie - snel als het kan, nauwkeurig als het moet. Om dat te bereiken, deed de groep aanpassingen aan de regelfunctie die Sun al had bedacht. Net als hij gebruikten zij het verschil tussen de gewenste en de daadwerkelijke spanning, maar zij voegden daar een derde macht aan toe. “Als er een groot spanningsverschil is, wordt die eerste term door die derde macht behoorlijk groot”, legt Rottschäfer uit. ”Dat zorgt ervoor dat het systeem in het begin heel sterk corrigeert.” Aan de tweede term, de tijdsafgeleide van het voltage, voegde de groep een extra term toe, waardoor de tijdsafgeleide alleen nog relevant is als de spanning in de buurt komt van het gewenste voltage.

$$D = k_1(V_o^* - V_o)^3 + k_2\frac{dV_o}{dt}\frac{1}{\cosh(k_4(V_o^* - V_o))} + k_3 \tag{3.2}$$

Nieuwe regelfunctie, in rood de toegevoegde termen. Door de derde macht en de cosh is de eerste term dominant bij grote spanningsverschillen. De tweede term stuurt pas bij wanneer de spanning in de buurt van de gewenste waarde komt.

“Wanneer je een groot spanningsverschil in je systeem hebt, doet de tijdsafgeleide van het voltage er niet toe - je wilt dan gewoon een sterke correctie uitvoeren op basis van het spanningsverschil. Maar zodra je in de buurt van de gewenste spanning komt, is die tijdsafgeleide wél belangrijk en mag die meedoen om de spanning naar het juiste niveau te sturen”, zo omschrijft Rottschäfer de nieuwe regelfunctie. ”Deze regelfunctie werkt veel beter, je hebt geen last van de instabiliteiten die je met de oude wel had.”

Sun is erg te spreken over deze ingreep: “Dit is echt out-of-the-box. De wiskundigen zijn gekomen met een oplossing waar ik zelf niet opgekomen zou zijn. Ik vind het een slimme functie. Wat ze bedacht hebben is ook weer niet zo ingewikkeld dat het in de praktijk niet uit te voeren is. Ik heb met collega’s gesproken, die denken dat het mogelijk is het systeem zo te bouwen. We gaan hiermee aan de slag, ik hoop het snel in de praktijk te kunnen testen.”

De wiskundigen hadden nog een stap verder willen gaan. De schakelfunctie die zij hebben bedacht, is namelijk een zelfbedachte functie en dus niet de optimale oplossing. Dus hebben zij ook een analytische oplossing uitgewerkt voor de regelfunctie. Deze oplossing is in de praktijk niet zomaar te gebruiken, door de benodigde rekentijd. Maar daar is een oplossing voor te vinden, aldus Rottschäfer: “Je zou op basis van de analytische oplossing een optimale set schakelfuncties kunnen maken. Ons advies zou zijn om dat te gaan doen.”

Dat idee sluit helemaal aan bij de ontwikkeling van meer adaptieve regelelektronica. “Traditiegetrouw zijn omvormers elektronica die gewoon hun werk doen - je sluit het aan en kijkt er niet meer naar om”, aldus Sun. ”Maar inmiddels is die elektronica steeds intelligenter en adaptiever geworden, computergestuurd, en met meer feedbackloops. Dit advies is daarmee in lijn.” Hij vond de week met de wiskundigen verfrissend. “Wat de studiegroep me heeft opgeleverd? Een andere kijk. Wiskundigen kijken echt anders naar deze vraag dan ik als elektrotechnicus. En daardoor is hun oplossing ook verrassend anders.”

Team DNV GL

Xingang Cao (Technische Universiteit Eindhoven)[1], Sangye Lungten[1], Vivi Rottschäfer (Universiteit Leiden)[2], Mara Smeele[2], Valentin Sulzer (University of Oxford), Raymond van Venetië (Universiteit van Amsterdam)[3], Kirsten Wang[3]