



Foto: Delta

BETROUWBAARHEID VAN ENERGIENETWERKEN BIJ ONZEKERHEID IN AANBOD EN VRAAG

Ben Zwart, winnaar Van Dantzigprijs: 'De komende jaren wil ik me richten op de wiskundige analyse van zeldzame gebeurtenissen en de toepassingen hiervan op energienetwerken. Ik ben erg enthousiast over dit onderwerp: het komt niet zo vaak voor dat een onderzoeksgebied zich presenteert met interessante wiskundige vraagstukken waarvan de oplossing een belangrijke maatschappelijke impact kan hebben.'

BERT ZWART

Ondanks de komst van big data blijven zeldzame gebeurtenissen zeldzaam, en blijven er geavanceerde wiskundige methoden en technieken nodig om inzicht te verkrijgen. Binnen de stochastische operations research zijn dergelijke technieken al met succes toegepast in de financiële en verzekeringswiskunde, en computercommunicatienetwerken. Hoewel die onderwerpen relevante inspiratiebronnen blijven, is er een nieuw toepassingsgebied in opkomst met nieuwe en urgente onderzoeksvragen: dat van energienetwerken, in het bijzonder elektriciteitsnetten.

Uitdagingen

Van elektriciteitsnetten wordt verwacht dat ze ten allen tijde functioneren. De opkomst van hernieuwbare energiebronnen en hervormde elektriciteitsmarkten (waarin spotprijzen nu mogen variëren in real-time, in plaats van bijvoorbeeld om de 15 minuten) heeft een en ander onder druk gezet. Al 80% van de knelpunten in het Europese net houdt verband met de integratie van hernieuwbare energiebronnen (Yang, 2015). Transport van energie, van waar het wordt geproduceerd tot daar waar het nodig is, kost tijd en is niet 100 procent efficiënt. Natuurkundewetten beperken de mogelijkheid om elektriciteitsnetten op te delen in afzonderlijke fysieke en gebruiker lagen – iets dat cruciaal is geweest in het ontwerp van computer- en communicatienetwerken (Low, 2013).

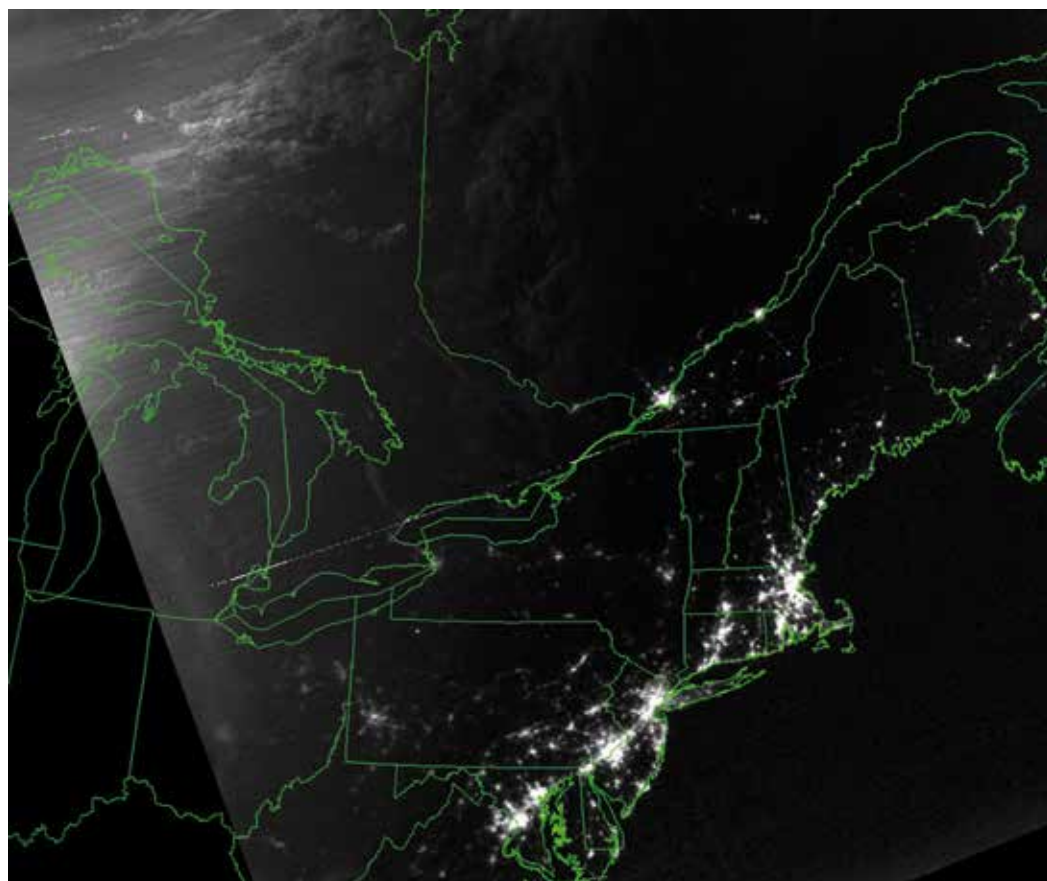
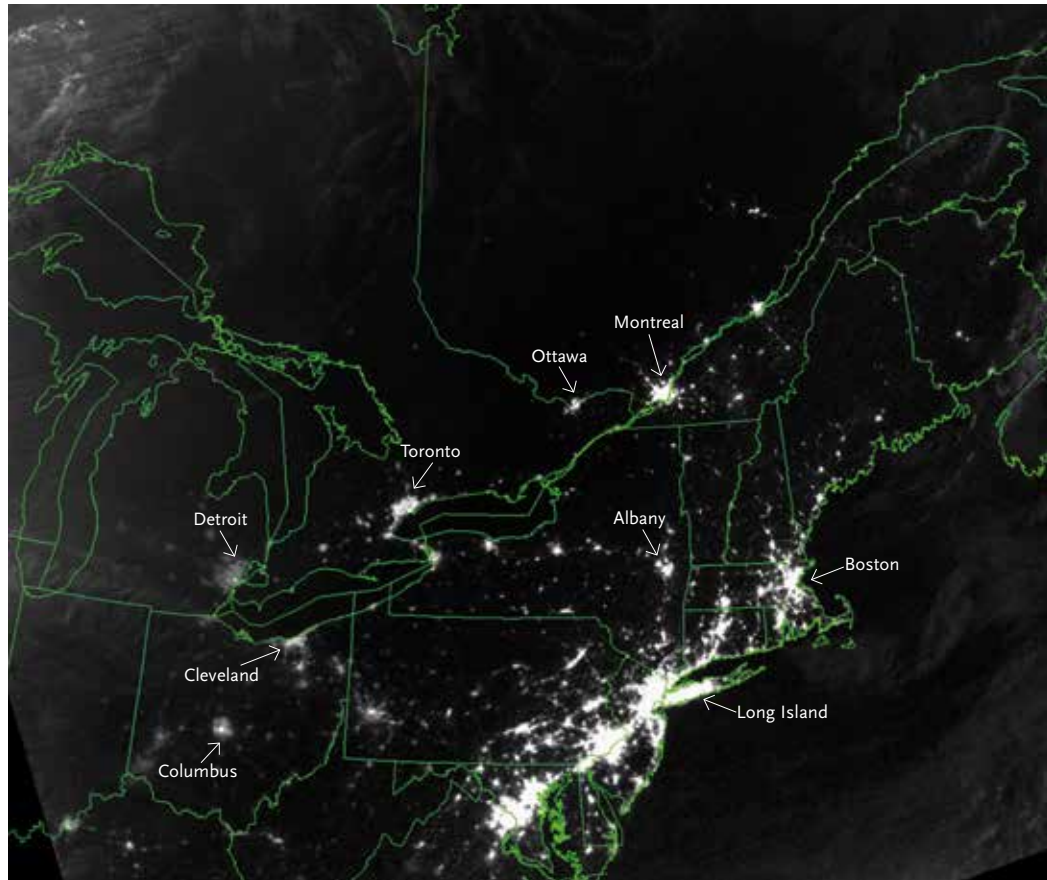
In de komende decennia moeten veel delen van de bestaande netwerkinfrastructuur worden vervangen. Het is daarom belangrijk om de betrouwbaarheid van de huidige én de toekomstige netwerkontwerpen vast te stellen. Op kortere tijdschalen, in de grootte van een paar tot circa 60 minuten, is het belangrijk om het effect van fluctuaties in zonne- en windenergie te begrijpen. Momenteel worden prognoses gezien als vaste waarden en wordt deze onvolledige informatie gebruikt om kortetermijn planning problemen zoals Optimal Power Flow (OPF) (Bienstock et al., 2012) op te lossen. Het lijkt zinvol om onzekerheid mee te nemen in deze optimalisatie procedures. Een betrouwbare netwerkplanning houdt

dan rekening met bepaalde randvoorwaarden, hetgeen een netwerkstoring tot een zeldzame gebeurtenis maakt. Een voorbeeld van zo'n randvoorwaarde is dat een transportlijn in een elektriciteitsnet niet langer dan twee minuten per jaar oververhit mag zijn (Wadman et al, 2012). Op een nog kortere tijdschaal, bijvoorbeeld seconden, kunnen innovatieve oplossingen worden gebruikt die hun bruikbaarheid hebben bewezen in communicatienetwerken, zoals toegangscontrole en prijsmechanismes gebaseerd op effectieve bandbreedtes (Bosman et al., 2014). Er zijn oplossingen nodig waarmee de negatieve invloed van prijsspeculaties op fluctuaties in het elektriciteitsnet beperkt kan worden.

Een concrete onderzoeksvraag

We richten ons nu op een model geïnspireerd door een aantal van de bovenstaande ontwikkelingen en het formuleren van een aantal onderzoeksvragen. Deze vragen, alsook hun gedeeltelijke antwoorden, komen voort uit een vruchtbare samenwerking tussen de *Stochastics* en *Scientific Computing* groepen op het CWI.

We modelleren het elektriciteitsnet als een graaf $G = (V, E)$ gedurende een tijdsperiode T . De vector γ van vermogens die aan de knooppunten van het netwerk op tijdstip o worden aangeboden heeft een aantal elementen die kunnen worden geoptimaliseerd. Het gaat er om de verzameling van deze vermogensinjecties F_p zodanig vast te stellen dat de kans dat een bepaalde randvoorwaarde qua betrouwbaarheid wordt overschreden ten hoogste p is, waarbij p in de orde 10^{-6} zal zijn. Een voorbeeld van een dergelijke beperking is dat alle stromen in het netwerk moeten worden begrensd door een voorgeschreven maximum C_{max} gedurende de planingsperiode. De reden voor een dergelijke beperking is dat een te hoge stroom kan leiden tot oververhitting van lijnen, waardoor deze uitzakken. In augustus 2003 raakte zo'n slappe lijn in het Noord-Amerikaanse elektriciteitsnet een boom, wat een gigantische storing tot gevolg had: 55 miljoen mensen zaten tot vier dagen lang zonder stroom.



Op 14 augustus 2003 viel in grote delen van het noordoosten van de Verenigde Staten en in Canada de elektriciteit uit. (boven) Satellietbeeld van het gebied op 14 augustus 2003, 20 uur voor de stroomuitval; (onder) 15 augustus, 7 uur na de stroomuitval. Bron: <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=3719>

We nemen aan dat de netto stromen welke op de knooppunten aan het net wordt aangeboden beschreven kunnen worden door een multidimensionaal diffusie proces $Y(t)$, $t \geq 0$. Dit is een stochastische differentiaalvergelijking waarvan de drijvende Brownse beweging een kleine (co)variantie heeft, i.e. de covariantiematrix is geschaald (vermenigvuldigd) met een parameter ε welke klein zal zijn in onze analyse; dit is een standaard aanpak in de theorie van grote afwijkingen. Laat $P(y, \varepsilon)$ de kans zijn dat de sup-norm van de stroomvectors $C(t)$ op tijdstip t C_{max} overschrijdt in het interval $[0, T]$. Voor een vaste ε is de verzameling van toegelaten stroominjecties F_p gegeven door $F_p = \{y: P(y, \varepsilon) \leq p\}$.

Wanneer deze verzameling expliciet beschreven kan worden door deterministische ongelijkheden, kunnen deze meegenomen worden in een planningsprocedure zoals OPF zodat de planning voldoet aan het betrouwbaarheids criterium. Helaas lijkt zo'n expliciete beschrijving te hoog gegrepen, de beschrijving vereist de oplossing van een zogenaamd *exit problem* voor een diffusie, waarbij de rand soms impliciet wordt beschreven door de AC power flow vergelijkingen. Om dit probleem toch aan te pakken kijken we op het CWI naar snelle simulatietechnieken en naar benaderingen die gebaseerd zijn op de theorie van grote afwijkingen (Bosman et al 2014, Wadman et al 2016). Een dergelijke benadering resulteert in een functie $I(y)$ zo dat $P(y, \varepsilon) \sim e^{-I(y)/\varepsilon}$.

Het idee is om de verzameling F_p te benaderen door de exacte kans $P(y, \varepsilon)$ te vervangen door deze benadering. De functie $I(y)$ wordt gegeven door de oplossing van een variationeel probleem, dat kan worden bestudeerd om eigenschappen van de gewijzigde versie van F_p af te leiden.

LITERATUUR

- Bienstock, D., Chertkov, M., & Harnett, S. (2014). Chance-constrained optimal power flow: Risk-aware network control under uncertainty. *SIAM Review*, 56(3), 461–495
- Boer, A. den (2015). Dynamic pricing and learning: Historical origins, current research, and new directions. *Surveys in Operations Research and Management Science* 20(1), 1–18.
- Bosman, J., Nair, J., & Zwart, B. (2014). On the probability of current and temperature overloading in power grids: A large deviations approach. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review* 42, 33–35.
- Low, S. (2013). *Communication and Power Networks: architecture*. <<https://rigorandrelevence.wordpress.com/2013/12/02/communication-and-power-networks-architecture-part-ii/>>.
- Wadman, W., Bloemhof, G., Crommelin, D., & Frank, J. (2012). Probabilistic Power Flow Simulation allowing Temporary Current Overloading. *Proceedings of Probabilistic Methods Applied to Power Systems 2012 (PMAPS)*, Istanbul.

- Wadman, W., Crommelin, D., & Zwart, B. (2016). A Large Deviation based Splitting Estimation of Power Flow Reliability. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, to appear.
- Yang, Y. (2015). Hybrid Grids. *DNV GL Strategic research & innovation position paper 2–2015*.
- Zwart, B. (2014). De macroscopie. *Nieuw Archief voor Wiskunde* 15(3), 176–179.

Bert Zwart studeerde in 1997 af als econometrist op de VU, en promoveerde in 2001 in de wiskunde op de TU/e. Momenteel is hij werkzaam als groepsleider op het CWI en is hij deeltijdhoogleraar aan de TU/e. Eerdere aanstellingen waren bij INRIA Rocquencourt, de VU en Georgia Tech in Atlanta. Aan het laatste instituut is hij momenteel nog steeds verbonden als adjunct-professor. In maart 2015 werd hem voor zijn werk (zoals dynamisch prijzen van goederen en macroscopische analyse van stochastische netwerken) de vijfjaarlijkse Van Dantzigprijs toegekend door de VvS+OR. E-mail: <Bert.Zwart@cwi.nl>.

VOORUITBLIK

Het hierboven beschreven onderwerp vormt de basis van het promotieonderzoek van Tommaso Nesti, die onlangs bij het CWI is begonnen in het kader van mijn VICI project *Rare Events*, en dat wordt uitgevoerd in samenwerking met DNV-GL. Dit project maakt deel uit van mijn onderzoeksambitie een uitgebreid wiskundig inzicht te verkrijgen in het vóórkomen van zeldzame gebeurtenissen in elektriciteitsnetten. Daarvoor is het ook noodzakelijk een inzicht in tweede orde effecten te verkrijgen: als een bepaalde lijn of een set lijnen breekt kan een kettingreactie van storingen optreden, hetgeen leidt tot een grote stroomstoring (een voorbeeld in de VS werd eerder genoemd – het meest recente voorbeeld in Nederland is 27 maart 2015 toen een miljoen huishoudens tot 5 uur lang verstoken waren van electriciteit). Dergelijke *cascading failures* worden momenteel bestudeerd door Fiona Sloothaak, promovendus aan de Technische Universiteit Eindhoven, in het programma *Networks*. Sem Borst is haar tweede promotor. Om te waarborgen dat onze modellen ook praktische relevantie hebben onderhouden we banden met Alliander, DNV-GL, Eneco en TNO. Zo gebruiken wij – Debarati Bhaumik, promovendus bij het CWI en mijn collega's Stella Kapodistria (TU/e) en Daan Crommelin (CWI) – data van bestaande windparken bij het ontwikkelen van statistische modellen voor het vermogen van windturbines toevoegingen. Debarati onderzoekt ook de voordelen van opslag (in batterijen) in elektriciteitsnetten, iets dat belangrijke connecties met wachtrij-problemen heeft. De laatste decennia is er een uiterst waardevolle connectie geweest tussen wachtrijen en communicatienetwerken. Ik verwacht dat zo'n connectie de komende decennia ook zal bestaan tussen wachtrijen en energienetwerken.