

HOE GAAT HET INDUSTRIËLE ELEKTRICITEITSNET VERANDEREN TIJDENS DE ENERGIETRANSITIE?



Hans Stutvoet

HOE GAAT HET INDUSTRIËLE ELEKTRICITEITSNET VERANDEREN TIJDENS DE ENERGIETRANSITIE?

Auteur:

ir. J. (Hans) Stutvoet

Directeur / elektrotechnisch ingenieur bij SVRI b.v.

T +31 (0)186 600730

M +31 (0)6 22992403

E hans.stutvoet@svri.nl

W www.svri.nl

LinkedIn : www.linkedin.com/in/hansstutvoet/nl

in opdracht van SVRI b.v.

Document nummer: 318001

Uitgave: Maart 2018

Ondanks alle zorg die besteed is aan de samenstelling van dit document kan SVRI b.v. geen aansprakelijkheid aanvaarden voor schade die het gevolg is van enige onvolkomenheid of fout in de inhoud van dit document.

Geen wind, geen productie

Al voor de industriële revolutie zijn er windmolens voor het vervaardigen van meel, olie, verf en papier, voor het zagen van hout en voor het oppompen van water. Deze molens hebben één roterende hoofdas, waaraan met drijfriemen en tandwielen van alles gekoppeld kan zijn.

Bij voldoende wind is de molen vol in bedrijf en maakt de molenaar overuren. Staat er geen wind of stormt het, dan ligt de productie stil. Hopelijk kan de molenaar dan de tijd nog vullen met onderhoud, reparaties of andere nuttige werkzaamheden. Naast proceskennis moet hij dus ook verstand hebben van het weer. Hij volgt de weersverwachting nauwgezet.



Tijdens de eerste industriële revolutie gaan fabrieken met stoommachines deze traditionele windmolens steeds meer vervangen. Continue productie op grotere schaal wordt mogelijk. Dankzij fossiele brandstoffen is de productie niet langer afhankelijk van het weer.

Door de komst van elektriciteitsvoorziening op grote schaal ontstaat in de loop van de tweede industriële revolutie verregaande industriële elektrificatie. Iedere

beweging krijgt een elektromotor op maat en er komt elektrisch licht. De opwekking van elektriciteit is gecentraliseerd en het geleverde vermogen past zich op ieder moment naadloos aan de vraag aan. Productie kan continu 24 uur per dag doorgaan.

In de derde industriële revolutie maken computers, digitalisering en vermogenselectronica bewegingen en processen nog meer flexibel en beheersbaar. Het elektriciteitsnet blijft echter de aorta in fabrieken: geen elektriciteit, geen productie.

Ondanks de duurzame energie die ze gebruiken, spelen traditionele windmolens geen rol van betekenis meer. Toch worden papier- en suikerfabrieken in het Engels nog altijd *paper mills* en *sugar mills* genoemd. En in Nederland zijn nog vijftig professionele molenaars actief. In 2017 is hun beroep opgenomen in de lijst van immaterieel cultureel erfgoed van UNESCO.

Momenteel zien we windmolens wel steeds meer terugkomen in Nederland, maar nu als windturbines om duurzame elektriciteit op te wekken. Het aanbod van deze windenergie zal -net als bij die oude, traditionele windmolens- echter flink gaan variëren. Toch willen we niet meer werken als een molenaar, maar productie als een continu proces.

Een hele uitdaging...

Inhoud

Geen wind, geen productie	3
Waarom dit e-book?	6
Huidige energievoorziening aan de industrie	8
Voeding, belasting en bedrijfsvoering in het industriële net.....	9
De energietransitie.....	17
Duurzame energiebronnen en opslag.....	22
Toekomstige energievoorziening aan de industrie.....	27
Voeding, opslag en belasting in het industriële net van de toekomst	30
Bedrijfsvoering in het industriële net van de toekomst	35
Ontwikkelingen in energievoorziening zijn nog onduidelijk	42
Duidelijke trends en tips	44

Waarom dit e-book?

Op woensdag 6 december 2017 bezocht ik het symposium *Smart Grids - Integrating Sustainable Renewable Energy* in het auditorium van de Technische Universiteit in Eindhoven. Elektrotechnische studievereniging Thor organiseerde dit symposium in het kader van haar 60^e verjaardag.

Dagvoorzitter Laetitia Ouillet (TU/e) en sprekers Jan Pellis (Stedin), Wil Scholten (Netbeheer Nederland), Yohanes Hugo (Elestor), René Kamphuis (TNO en TU/e) en Han Slootweg (Enexis en TU/e) schetsten in hun boeiende presentaties een visie op de integratie van duurzame energie.

Fossiele brandstoffen zoals benzine en aardgas zullen verdwijnen. Dat zal leiden tot een toenemende vraag naar elektriciteit. Het aanbod van elektriciteit zal echter flink fluctueren. Flexibele belasting met behulp van Smart Grids enerzijds en energieopslag anderzijds zullen vraag en aanbod op elkaar moeten afstemmen. Duurzame opwekking en opslag van elektriciteit, de ontwikkeling van openbare netten en de gevolgen voor woningen, kantoorpanden en wegtransport krijgen ruim de aandacht.

Als elektrotechnisch ingenieur houd ik mij eigenlijk al mijn hele werkzame leven bezig met elektriciteitsopwekking en middenspanningsnetten in de industrie en offshore. Daarom komen vragen in mij op:

- Hoe gaat het industriële elektriciteitsnet veranderen tijdens de energietransitie?
- Kan de industrie wel verder draaien zonder aardgas?
- Blijft eigen opwekking met synchrone generatoren bestaan in de industrie? Of komen er andere vormen van eigen opwekking?

Vragen waarop ik tijdens dit overigens heel interessante symposium eigenlijk geen duidelijk antwoord krijg.

Reden genoeg om zelf een klein onderzoek te doen, mijn ideeën via dit e-book te delen en ter discussie te stellen. Ik wil graag een visie ontwikkelen op de veranderingen in het industriële elektriciteitsnet en eigen opwekking. Engineers en managers die verantwoordelijk zijn voor vervangingen of uitbreidingen van het elektrische distributienetten in de industrie, reken ik tot mijn doelgroep. Van hun hoop ik immers feedback te krijgen.

De energietransitie is een heel breed onderwerp waarvan niemand alle beschikbare en in ontwikkeling zijnde technologieën kan overzien. Daarom heb ik me zoveel mogelijk beperkt tot de mogelijke consequenties voor het industriële elektriciteitsnet.

Huidige energievoorziening aan de industrie

De meeste industriële bedrijven in Nederland gebruiken momenteel aardgas uit het openbare gasnet en elektriciteit uit het openbare elektriciteitsnet voor al hun energiebehoeften. Aardgas is er voor ruimteverwarming en warm water.

Elektriciteit voor kracht, licht, apparaten en ICT.

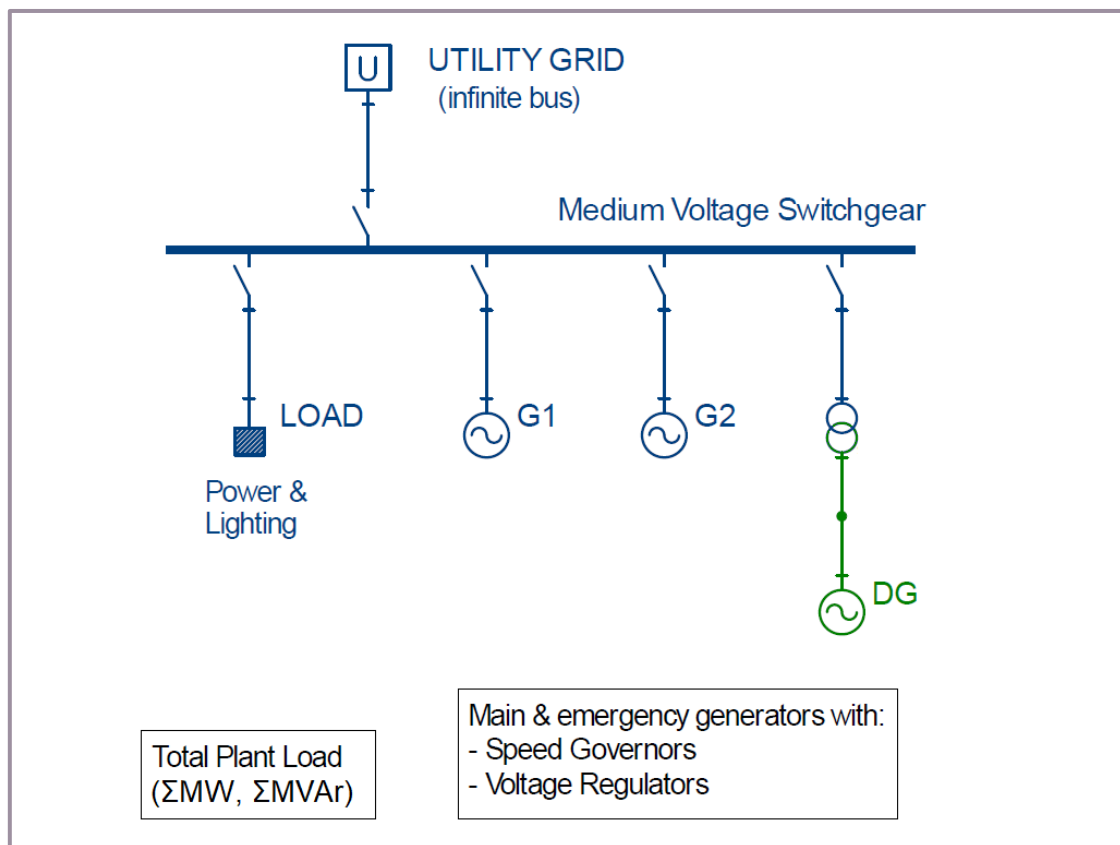
De Nederlandse procesindustrie (raffinaderijen, chemie, staal en metaal, cement, papier en karton, voedings- en genotsmiddelen) heeft daarnaast ook behoefte aan hoge temperatuurwarmte. Voor het opwekken van deze proceswarmte wordt meestal aardgas gebruikt. De sector staal en metaal gebruikt ook kolen. De meeste producenten van discrete producten, zoals verpakte voedingsmiddelen, machines, apparaten, auto's en elektronica hebben geen behoefte aan proceswarmte.

Voor veel energie-intensieve bedrijven is stoom één van de belangrijkste energiedragers. De gebruiker van de hoogste druk of temperatuur bepaalt de opgewekte stoomdruk. Voor de andere gebruikers moet de stoomdruk worden gereduceerd tot de gewenste druk. Stoomturbines met generatoren worden vaak gebruikt om stoomdruk te reduceren. Bij deze warmtekrachtkoppeling (WKK, Engels: *cogeneration, combined heat & power, CHP*) komt als een -wel heel belangrijk- bijproduct elektriciteit vrij.

Industrieën met eigen opwekking consumeren hun elektriciteit in eerste instantie zelf. De stoomvraag is meestal leidend, waardoor het aanbod van elektriciteit meestal niet gelijk is aan de vraag. Het sterke openbare elektriciteitsnet zal het verschil in elektrisch vermogen op ieder moment probleemloos leveren of opnemen.

Voeding, belasting en bedrijfsvoering in het industriële net

In onderstaand grondschematische zijn de huidige mogelijke voedingen en belasting van het industriële elektriciteitsnet vereenvoudigd weergegeven. Naast het openbare net zijn de generatoren (G1, G2) en/of een (nood) dieselgenerator (DG) mogelijke voedingsbronnen. Alle gebruikers zijn als één grote belasting opgenomen. De belasting bestaat vooral uit kracht en licht, maar ook uit apparaten en ICT.



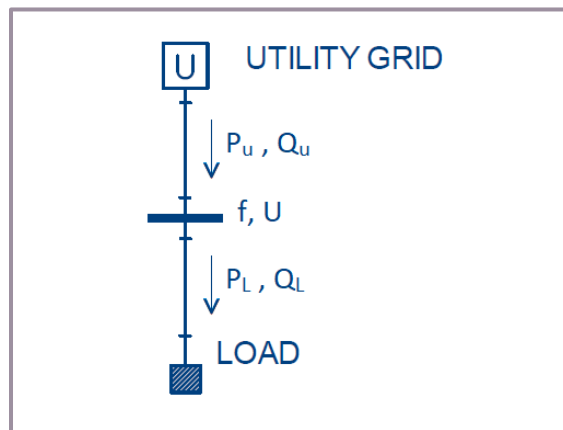
Het lokale industriële elektriciteitsnet kan op verschillende manieren worden gevoed. Daarom onderscheid ik de volgende vormen van bedrijfsvoering:

- Geen eigen opwekking (openbaar net, geen generatoren)
- Alleenstaand bedrijf (één generator, geen openbaar net)

- Gekoppeld bedrijf (openbaar net en één of meerdere generatoren)
- Eilandbedrijf (meerdere generatoren, geen openbaar net)

Geen eigen opwekking

Als er geen eigen opwekking is, voedt het openbare net alle aangesloten belasting. De meeste producenten van discrete producten hebben geen eigen generatoren. Alle elektrische energie die deze bedrijven nodig hebben komt uit het openbare net.

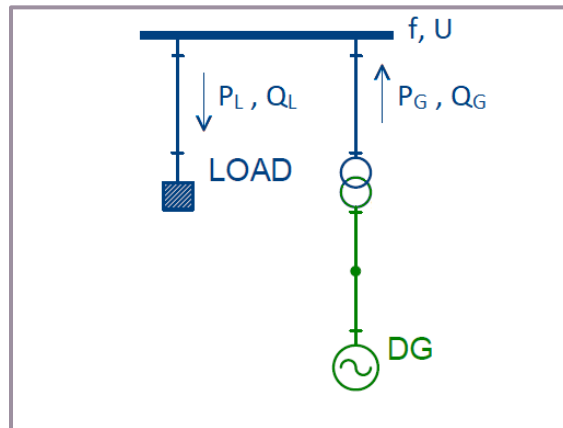


De totale belasting bepaalt de vraag naar actief vermogen (P_L in MW) en reactief vermogen (Q_L in MVar). Het openbare net drukt frequentie en spanning op en als gevolg daarvan past het door het net geleverde vermogen (P_U en Q_U) zich aan. Als de netaansluiting groot genoeg is, is deze bedrijfsvoering eigenlijk altijd stabiel.

Alleenstaand bedrijf

In alleenstaand bedrijf (Eng. *stand-alone operation*) is een generator niet gekoppeld met andere generatoren of met het openbare net. Als geïsoleerde eenheid voedt de generator alle aangesloten belasting.

Voorbeelden zijn noodstroomgeneratoren en sets voor 'black starts', maar ook verplaatsbare diesel-generator sets op bouwplaatsen of voor evenementen.

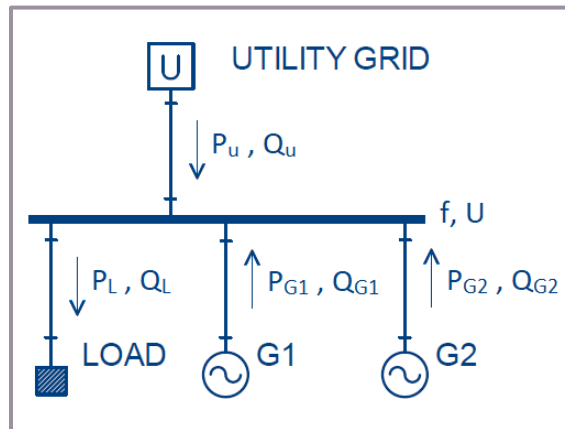


De totale belasting bepaalt ook hier het gevraagde vermogen. De toerenregeling van de motor (of turbine) regelt de toevoer van brandstof en houdt de frequentie constant. Het door de generator geleverde actief vermogen (P_G) past zich daardoor aan de vraag (P_L) aan. De spanningsregelaar van de generator regelt de bekrachtigingsstroom en houdt de spanning constant. Het door de generator geleverde reactief vermogen (Q_G) past zich daardoor aan de vraag (Q_L) aan.

Alleenstaand bedrijf is niet altijd stabiel. Als er bijvoorbeeld een grote motor of een groep gebruikers in één keer wordt in- of uitgeschakeld, kan een beveiliging aanspreken of kan de dieselmotor afslaan. En als de belasting te hoog is, zal de motor het normale toerental niet halen en de frequentie te laag blijven. Is de frequentie permanent te hoog, dan levert de generator teveel vermogen (b.v. door een defecte toerenregelaar).

Gekoppeld bedrijf

Als één of meer generatoren en het openbare net het industriële elektriciteitsnet voeden, is dat gekoppeld bedrijf (Eng. *on-line*). Bij de procesindustrie is dit meestal de normale manier van bedrijfsvoering.



De totale belasting bepaalt de vraag naar actief en reactief vermogen (MW, MVar). De hoeveelheid brandstof of stoom bepaalt het asvermogen van de motoren of turbines en daarmee het actieve vermogen (MW) dat de generatoren leveren. De bekrachtigingsstroom bepaalt het reactieve vermogen (MVar) dat de generatoren leveren. Er kan zo een verschil ontstaan tussen het gevraagde vermogen en het door de generatoren geleverde vermogen.

Als het openbare net erg sterk is, zal het de frequentie en spanning opdrukken.

Als gevolg daarvan past het door het net geleverde vermogen (P_U en Q_U) zich aan.

Er ontstaat dus evenwicht:

$$\text{actief vermogen: } P_U = P_L - P_{G1} - P_{G2}$$

$$\text{reactief vermogen: } Q_U = Q_L - Q_{G1} - Q_{G2}$$

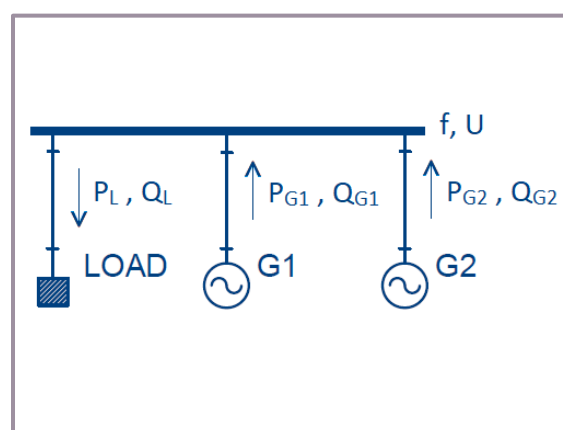
Als P_U en Q_U positief zijn, dan wordt er vermogen uit het net geïmporteerd. Zijn ze negatief, dan wordt er vermogen naar het net geëxporteerd.

Als de netaansluiting groot genoeg is, is gekoppeld bedrijf eigenlijk altijd stabiel. Veel regelingen in industriële elektriciteitsnetten werken momenteel alleen naar behoren als het openbare net bij gekoppeld bedrijf het verschil in vermogen te allen tijde zal aanvullen of opnemen.

Eilandbedrijf

In eilandbedrijf (Eng. *isolated, island operation*) is een generator gekoppeld met één of meer andere generatoren, maar niet met het openbare net. Als een geïsoleerd systeem voeden de generatoren gezamenlijk alle aangesloten belasting. Voorbeelden zijn de elektriciteitsvoorziening op schepen, olie- en gasplatforms op zee (offshore) of elektriciteitsvoorziening in afgelegen gebieden of op eilanden.

De totale belasting bepaalt de vraag naar actief en reactief vermogen (MW, MVar). De toerenregelaars van de aandrijvingen en de spanningsregelaars van de generatoren zullen gezamenlijk moeten zorgen voor een constante frequentie en spanning in het industriële elektriciteitsnet.



Er moet weer evenwicht zijn, maar binnen grenzen kun je zelf bepalen hoe het geleverde vermogen over de generatoren verdeeld wordt, zolang:

actief vermogen: $P_L = P_{G1} + P_{G2}$

reactief vermogen: $Q_L = Q_{G1} + Q_{G2}$

Eilandbedrijf is niet altijd stabiel. Wisselende vraag van de verbruikers zal dit evenwicht immers verstoren. Als er teveel belasting in één keer wordt in- of uitgeschakeld, kan een beveiliging aanspreken. En als de belasting te hoog is, zal de motor het normale toerental niet halen en de frequentie te laag blijven.

Uitval van een generator of storingen in het distributienet kunnen dit evenwicht ook verstoren. Na uitval van een generator kan het noodzakelijk zijn om heel snel wat (non-preferente) belasting af te schakelen, zodat andere generatoren de vraag aankunnen en door blijven draaien. Bij bijvoorbeeld kortsluiting in een afgaande groep, zal de beveiliging deze groep snel afschakelen. De generatoren zien dan dat er veel belasting in één keer wordt afgeschakeld.

Na een verstoring herstelt het evenwicht zich door achtereenvolgens de:

- initiële respons (bepaald door massatraagheid en reactanties)
- primaire regelingen (toerenregelaars en spanningsregelaars)
- secundaire regelingen
- tertiaire regelingen

Initiële respons

De initiële respons is de verandering in toerental (frequentie) en spanning, voordat de regelingen kunnen ingrijpen. De totale massatraagheid van alle generatoren (en eventueel ook de direct gekoppelde motoren) zal de verandering in toerental en frequentie tegenwerken en bepaalt daarmee dus de initiële frequentieverandering (Engels: *rate of change of frequency, RoCoF*). De magnetsiche flux van alle generatoren (en eventueel ook de direct gekoppelde

motoren) zal de verandering in spanning tegenwerken en bepaalt daarmee dus de spanningsdip of piek. De subtransiënte en transiënte reactanties worden gebruikt om de spanningsdip of piek te berekenen.

Primaire regelingen

De toerenregelaars van de aandrijvingen van alle generatoren reageren samen. Zij zorgen voor meer of minder stoom of brandstof en asvermogen, zodat het evenwicht in het actieve vermogen zich automatisch herstelt. Voorwaarde voor een goede werking van de primaire regeling is wel een goede verdeling van de vereiste draaiende reserve over de generatoren. Verder zal de frequentie niet meer exact gelijk aan de systeemfrequentie zijn door de statiek in de toerenregelaars.

De spanningsregelaars van alle generatoren reageren ook samen. Zij zorgen voor meer of minder bekrachtigingsstroom, zodat het evenwicht in het reactief vermogen zich automatisch herstelt. De spanning zal echter ook niet meer exact gelijk aan de systeemspanning door de statiek in de spanningsregelaars.

Secundaire regelingen

De secundaire frequentieregeling is een overall regeling die de wenswaarden van de toerenregelaars zodanig wijzigt dat het evenwicht tussen gevraagd en totaal geleverd actief vermogen gehandhaafd blijft, terwijl de frequentie weer gelijk wordt aan de systeemfrequentie.

De secundaire spanningsregeling is een overall regeling die de wenswaarden van de spanningsregelaars zodanig wijzigt dat het evenwicht tussen gevraagd en totaal geleverd reactief vermogen gehandhaafd blijft, terwijl de spanning weer gelijk wordt aan de systeemspanning.

Tertiaire regelingen

De tertiaire regelingen zijn ook overall regelingen die de belasting anders kunnen verdelen over de generatoren, bijvoorbeeld zo economisch mogelijk of om de draaiende reserve goed te verdelen.

Power Management System (PMS)

Voor gekoppeld bedrijf en voor eilandbedrijf is de bedrijfsvoering vaak geautomatiseerd met een Power Management System (PMS). Als het elektriciteitssysteem geen eigen opwekking heeft en dus alleen door het openbaar net wordt gevoed, dan is een PMS niet nodig. Als slechts één generator in het hele systeem voedt ook niet.

De functies een PMS kunnen zijn:

- Secundaire en tertiaire regeling voor frequentie, spanning en lastverdeling (MW, MVar)
- Plant power factor control
- Automatisch starten en stoppen van generatoren
- Synchronisatie
- Afschakelen van belasting bij plotselinge uitval van een generator (Engels: *fast load shedding*)
- Afschakelen van belasting bij overbelasting (Engels: *slow load shedding*)
- Blokkeren inschakelen van grote motoren als te weinig generatoren draaien
- Voldoende draaiende reserve handhaven
- Opstarten vanuit het donker (Engels: *Blackout Start*)
- Monitoring van o.m. frequentie, spanning, vermogens en standen schakelaars
- Communicatie met SCADA systemen

De energietransitie

Met *energietransitie* (Engels: *energy transition*, Duits: *Energiewende*) wordt de structurele, lange-termijn overgang van fossiele brandstoffen naar duurzame energiebronnen bedoeld. Na het Klimaatakkoord van Parijs in 2015 is dat een mondiale aangelegenheid, ook al heeft de V.S. zich in 2017 officieel teruggetrokken.

Fossiele brandstoffen, zoals kolen, aardolie en aardgas, hebben minstens twee belangrijke nadelen. Ten eerste komt er bij de verbranding CO₂ (kooldioxide) vrij. Dit broeikasgas versterkt verdere opwarming van de aarde. Ten tweede komen olie en gas uit veelal politiek instabiele landen, waar we niet graag afhankelijk van zijn. Als derde nadeel wordt wel gesteld dat de mondiale voorraden fossiele brandstoffen uitgeput raken, maar zeker voor de komende decennia is er nog ruim voldoende.

In Europees verband is de ambitieuze doelstelling van 80-95% reductie van broeikasgasemissie in 2050 ten opzichte van 1990 voor de hele economie afgesproken. In 2020 moet 20% reductie gerealiseerd zijn en 40% in 2030. Ook het Nederlandse kabinet streeft naar een CO₂-arme, veilige, betrouwbare en betaalbare energievoorziening in 2050.

In mijn zoektocht naar informatie om erachter te komen hoe het industriële elektriciteitsnet gaat veranderen, heb ik veel interessante, zeer recente documenten gevonden. De energietransitie is een hot item.

Twee Nederlandse e-books wil ik met name noemen, omdat ik ze veelvuldig heb geraadpleegd:

- Ministerie van Economische Zaken, *Energierapport - Transitie naar duurzaam*, januari 2016
- Vereniging voor Energie, Milieu en Water (VEMW), *Samen op weg naar minder - Hoe Nederlandse energie-intensieve bedrijven helpen om de CO₂-uitstoot te verlagen*, 16 juni 2016



Daarnaast heb ik ook veelvuldig geraadpleegd:

- Agora Energiewende, *A Snapshot of the Danish Energy Transition*, nov. 2015

In het *Energierapport* geeft het kabinet een integrale visie op de toekomstige energievoorziening in Nederland. Om 80-95% broeikasgasemissiereductie in 2050 te halen, vindt de overheid enerzijds een omslag naar CO₂-arme energiebronnen noodzakelijk en anderzijds energiebesparing. Bovendien vereist een CO₂-arme energievoorziening meer ruimte, omdat nieuwe, schone vormen van opwekking, opslag en transport van energie lokaal moeten worden ingepast (decentrale opwekking). Het gasnet zal inkrimpen of zelfs geheel verdwijnen en elektriciteit als energiedrager zal toenemen (elektrificatie).

De vier energiefuncties

In het *Energierapport* citeert het kabinet de vier energiefuncties die de Raad voor de leefomgeving en infrastructuur (Rli) onderscheidt:

- warmte van lage temperatuur (verwarming en warm water in woningen, kantoren, gebouwen, tuinbouwkassen en industrie)
- warmte van hoge temperatuur (proceswarmte in de industrie)
- transport en mobiliteit (vervoer)
- kracht en licht (aandrijvingen, verlichting, elektrische apparaten en ICT)

voor verwarming en warm water in gebouwen worden warmtepompen, zonneboilers, warmtenetten op basis van restwarmte of van geothermie en groen gas genoemd. Eind 2020 moeten alle nieuwe gebouwen bijna-energie neutraal zijn. Goede isolatie moet energie besparen.

Voor vervoer worden elektrische aandrijving en vloeibare biobrandstoffen en (bio-)LNG als opties genoemd. Gedeeld autogebruik en benutting van lichtere materialen en efficiëntere motoren moeten energie besparen in het vervoer.

Duurzame bronnen voor elektriciteitsproductie voor kracht en licht zijn vooral zon, wind en water. Flexibiliteit in de vraag naar elektriciteit wordt belangrijk, omdat deze duurzame bronnen variabele productieniveaus door wisselende weersomstandigheden leveren. Apparaten en lampen moeten energiezuiniger worden.

Minder concrete plannen voor vergaande verduurzaming proceswarmte

Voor vergaande verduurzaming van proceswarmte in de industrie zijn minder concrete plannen voor een CO₂-arme sector dan bij de andere drie

energiefuncties. Dat komt enerzijds doordat de technologie zich verder moet ontwikkelen en anderzijds door mondiale concurrentie. Het kabinet verwacht van de industriële bedrijven wel dat zij hun verantwoordelijkheid nemen en investeren in al rendabele energiebesparende technieken.

Een uitdaging voor de industrie is om processen zodanig in te richten dat minder warmte of warmte met een lagere temperatuur nodig is. Verder ziet de VEMW voor het verbeteren van de energie-efficiëntie vooral kansen in ketenmaatregelen (buiten de bedrijfspporten), zoals bijvoorbeeld het aanbieden van restwarmte aan nabij gelegen bedrijven of aan een warmtenet en besparing in transport. Productieprocessen zijn al verregaand geoptimaliseerd, dus alleen geheel nieuwe technologieën zouden hier nog energiebesparing kunnen opleveren.

Lessen uit Denemarken

Sommige landen zijn gezegend met een overvloed aan natuurlijke hulpbronnen zoals olie, metalen, goud of diamanten. De Denen hebben wind. Heel veel wind. En daar maken ze gebruik van.

Denemarken is één van de koplopers in Europa op het gebied van de energietransitie (Deens: *grøn omstilling*). Windenergie dekt momenteel al meer dan 40% van de totale elektriciteitsvraag in Denemarken. De meeste Deense centrales werken nog wel op kolen, maar er is een verschuiving naar energie uit biomassa.

Nederland heeft net als Denemarken heel veel wind, maar er zijn ook verschillen. Zo is de transport de grootste gebruiker van energie in Denemarken, gevolgd door huishoudens. Zware industrie is er eigenlijk niet, dus er is geen vraag naar proceswarmte. De energieopwekking in Denemarken is al heel lang decentraal

met veel lokale WKK eenheden voor warmte en elektriciteit. Maar in Nederland zijn er ook plannen om flink in te zetten op windenergie. Daarom heb ik in de volgende hoofdstukken de ervaringen van de Denen verwerkt.

Sceptici

Er zijn sceptici die eraan twifelen of een stijging van de concentratie broeikasgassen in de atmosfeer de opwarming van de aarde veroorzaakt. Zij denken dat natuurlijke variatie de belangrijkste reden voor de temperatuurstijging is.

Anderen zijn ervan overtuigd dat de opwarming van de aarde een complot is en dat klimaatwetenschappers gegevens over klimaatverandering manipuleren. Hun bewijs is Climategate, een incident uit 2009, waarbij hackers of klokkenluiders e-mails en documenten van de Climatic Research Unit (CRU) openbaar maakten. In Nederland is daarna de website climategate.nl opgericht.

De Groene Rekenkamer is vooral kritisch over het overheidsbeleid in Nederland. Op hun website (www.groenerekenkamer.nl) staan publicaties en artikelen met titels als: "Duitse zon- en windenergie vooral grote subsidieslurpers", "De Energiewende, Duitsland als voorbeeldland? Nee, bedankt!" en "De dodelijke keerzijde van windenergie".

Ondanks al deze scepsis en ondanks het feit dat president Trump heeft aangekondigd dat de Verenigde Staten zich terugtrekken uit het klimaatakkoord van Parijs, ben ik ervan overtuigd dat met de energietransitie een onomkeerbaar proces in gang is gezet.

Duurzame energiebronnen en opslag

Als gevolg van de energietransitie zullen duurzame energiebronnen de fossiele brandstoffen gaan vervangen. Het aanbod van duurzame energie in Nederland zal flink gaan variëren. Daarom lijkt energieopslag onvermijdelijk. In dit hoofdstuk inventariseren we duurzame energiebronnen en mogelijkheden voor energieopslag.

Wat zijn de belangrijkste vormen van duurzame energie?

Duurzame energie (Engels: *sustainable energy*, Duits: *Nachhaltige Energie*) is energie uit bronnen die van nature worden aangevuld op een menselijke tijdschaal en weinig milieuschade met zich meebrengen. Hernieuwbare energie (Engels: *renewable energy*, Duits: *Erneuerbare Energien*) is energie uit bronnen die voor praktisch onbeperkte tijd te gebruiken is, maar er mag milieuschade zijn. CO₂-arme energie (Engels: *low carbon energy*) wordt ook gebruikt voor energiebronnen die niet duurzaam of hernieuwbaar zijn, zoals elektriciteit uit kolencentrales met CO₂-afvang en -opslag (CCS) of kernenergie. Er zijn overigens meer definities mogelijk en deze termen worden ook wel als synoniem gebruikt.

De belangrijkste vormen van duurzame energie zijn:

- Windkracht - windturbines op land (onshore), windturbines op zee (offshore)
- Energie uit water - waterkracht bij stuwdam of waterval, golfslagenergie, getijdenenergie, blauwe energie door zoutconcentratieverschil (PRO), temperatuurverschil in de oceaan (OTEC)
- Zonne-energie - zonnepanelen of PV-cellen, zonnecollectoren, CSP met spiegels, zonnetorens, foto-elektrochemische cellen
- Geothermische energie - aardwarmte
- Bio-energie - bio-ethanol, biodiesel, biogas, houtsnippers

In 2014 berekende het Danish Energy Agency kostprijzen van opwekking van elektriciteit met duurzame bronnen. DEA komt tot de volgende conclusie in volgorde van goedkoop naar duur:

1. Windturbines op land: 4 ct / kWh
2. Windturbines op zee: 8 ct / kWh
3. Nieuwe centrales en omgebouwde bestaande kolencentrales die op houtsnippers werken
4. Elektriciteit uit zonnepanelen en gedecentraliseerde WKK's op bio-energie

Windenergie is dus de goedkoopste energiebron in Denemarken. Windturbines op land wekken goedkoper elektriciteit op dan welke andere manier ook, fossiele brandstoffen inbegrepen. De kostprijs per kWh van elektriciteit opgewekt door windturbines op zee ligt twee keer hoog, maar is nog steeds de op één na goedkoopste manier.

Toch zijn er enkele kanttekeningen. De berekeningen van DEA zijn uiteraard afhankelijk van de materiaalprijzen (b.v. staal) en van de rente (nu uitzonderlijk laag). Bij windturbines op zee moet ook een elektrisch transportnet worden meegerekend. Windturbines op land hebben vaak lokaal afnemers. Verder is er extra investering nodig voor energieopslag. Het waait immers niet altijd.

Het International Renewable Energy Agency (IRENA) verwacht dat de prijs maar liefst met 35% voor windturbines op zee en 26% voor windturbines op land gaat dalen tussen nu en 2025. De windmolens worden steeds groter, zodat capaciteit en rendement toenemen.

Het rendement van zonnepanelen (Engels: *PV cells*) is momenteel 15% tot 20%, maar de haalbaarheid van een rendement van meer dan 40% is al bewezen.

Hoewel in Denemarken drie geothermische plants in bedrijf zijn, wordt geothermische energie in het rapport van Agora buiten beschouwing gelaten.

Welke mogelijkheden zijn er voor elektrische energieopslag?

Momenteel zijn fossiele brandstoffen dé vorm van energieopslag. Op zich is dat ideaal: relatief goedkoop en je kunt het verbranden wanneer en zoveel je nodig hebt. Bovendien is het te gebruiken als energiebron voor verwarming, proceswarmte, transport en kracht en licht. Willen we geen fossiele brandstoffen meer gebruiken, dan zijn andere vormen van energieopslag noodzakelijk.

Er zijn vele vormen van elektrische energieopslag (Engels: *Electrical Energy Storage, EES*). Ze kunnen ingedeeld worden naar hun toepassing. Daarbij zijn opgeslagen energie (kWh of J), het maximale vermogen (kW) en de te overbruggen tijdsduur van belang. Daarnaast soms ook de minimale oplaadtijd.

De belangrijkste vormen van elektrische energieopslag zijn:

- Zeer korte ontladingstijd (milliseconden - seconden): traagheid van roterende massa, zoals generatoren (incl. turbine en tandwielkast) en synchrone compensatoren
- Korte ontladingstijd (seconden - minuten): (super) condensatoren, supergeleidende magnetische energie opslag en vliegwielen
- Middellange ontladingstijd (minuten - uren): accu's en batterijen
- Lange ontladingstijd (dagen - maanden): Vanadium-Redox-accumulators, waterkracht met pomppaciliteit (PHS), gecomprimeerde lucht (CAES) i.c.m. gasturbines en vormen van Power-to-Gas (P2G), zoals waterstof (H₂) i.c.m. brandstofcellen of synthetisch methaan (SNG) of H₂fuel in combinatie met verbrandingsmotoren

Bovengenoemde methoden van energieopslag zijn bi-directioneel: ze kunnen elektriciteit opslaan en weer afgeven. Met uit biomassa verkregen biogas en/of pyrolyse-olie (brandstof voor ketels en WKK) is het alleen mogelijk om elektriciteit af te geven. Met Power-to-Heat (P2H), Power-to-Cold (P2Co), Power-to-Chemicals (P2Ch) en Power-to-Products (P2P) kun je extra aanbod van elektriciteit ook nuttig gebruiken, maar niet meer naar elektriciteit omzetten.

Combinaties van vormen van elektrische energieopslag kunnen wenselijk zijn. Zo heeft onder meer KEMA (nu DNV GL) in het kader van Growders onderzoek gedaan naar de opslag van elektriciteit in buurtbuffers, bestaande uit een combinatie van accu's en een vliegwiel. De accu's zorgen voor de benodigde capaciteit, terwijl het vliegwiel het gevraagd piekvermogen levert

Deens dilemma: meer windenergie of bio-energie?

In de nabije toekomst zullen de Denen een keuze moeten maken tussen:

- investeren in nog meer windenergie door windturbines op zee te plaatsen
- importeren van bio-energie en investeren in hun installaties

Kiezen de Denen voor windturbines op zee, dan moet de elektrificatie verder toenemen om grote, wisselende hoeveelheden elektriciteit te kunnen consumeren of op te slaan. Opslag in waterstof (H₂) ziet men daarbij als een serieuze mogelijkheid. Verwarming en transport zullen zoveel mogelijk elektrisch moeten plaatsvinden.

Als de Denen voor bio-energie kiezen, dan zullen ze een groot deel hiervan moeten importeren. Betaalbare en gegarandeerde levering wordt dan de uitdaging. Het is voor mij zeer de vraag of er elders wel voldoende bio-energie

beschikbaar is voor deze optie. Daarnaast zullen de gedecentraliseerde WKK's geschikt gemaakt moeten worden voor bio-energie i.p.v. kolen.

Toekomstige energievoorziening aan de industrie

Gebruik van duurzame energiebronnen en eventueel opslag heeft gevolgen voor de energievoorziening aan de meeste industriële bedrijven in Nederland in de toekomst. Zo is het de vraag of het openbare gasnet beschikbaar blijft voor de industrie en, zo ja, of de hoge kwaliteit van het geleverde gas gehandhaafd blijft. Het openbare elektriciteitsnet zal ongetwijfeld beschikbaar blijven, maar gaat zich waarschijnlijk heel anders gedragen.

Blijft het openbare gasnet beschikbaar voor de industrie?

Het is niet te zeggen of en hoe lang het openbare gasnet beschikbaar is voor de industrie. Politieke besluitvorming kan heel grillig zijn. Illustratief is de brief afgelopen januari van de minister van Economische Zaken en Klimaat, Eric Wiebes, aan 200 industriële grootverbruikers. Wiebes schrijft dat het kabinet in de komende periode tot 2022 de levering van laagcalorisch gas (G-gas) uit Groningen versneld gaat uitfaseren.

Als het openbare gasnet beschikbaar blijft voor de industrie, dan is de vraag welke brandstof uit het openbare gasnet komt en tegen welke prijs. Hoogcalorisch aardgas (H-gas)? Of wordt het waterstof? Of Synthetisch of biologisch gewonnen methaan? Hoe vaak gaat de samenstelling van het gas en/of de gasdruk nog wijzigen?

De procesindustrie heeft (vooralsnog) in ieder geval brandstof nodig voor hoge temperatuurwarmte. Verdwijnt de gasaansluiting wel, dan is de vraag hoe de grote hoeveelheden energie, die de energie-intensieve bedrijven minimaal nodig hebben, zullen worden geleverd en opgeslagen.

Hoe verandert het gedrag van het openbare elektriciteitsnet?

Elektriciteit in Nederland wordt vooral centraal opgewekt door fossiele brandstoffen om te zetten met behulp van turbines en grote synchrone generatoren daaraan gekoppeld. Hun massatraagheid is een vorm van energieopslag voor korte duur en fossiele brandstof voor lange duur.

Stel dat elektriciteit in de toekomst alleen uit wind- en zonne-energie zou worden opgewekt, dan kan vraag en aanbod alleen gelijk worden gemaakt door:

- Regelbare, flexibele belasting
- Opslag van elektriciteit
- Niet alle wind- of zonne-energie gebruiken bij te hoog aanbod

Alle drie de opties kosten geld. Daarom zal men proberen om slechts een deel van het net te voeden met elektriciteit uit zonne- en windenergie. Het aanbod van elektriciteit uit fossiele brandstoffen, maar ook uit duurzame bronnen zoals waterkracht, bio-energie en geothermische energie is immers wel regelbaar.

In Nederland neemt het aantal windturbines op land, windturbines op zee en zonnepanelen (PV) de komende jaren flink toe. Het is daarom realistisch dat tarieven voor elektriciteit ieder uur worden aangepast en letterlijk zo veranderlijk zullen zijn als het weer. Er zal een verwachting komen voor deze tarieven voor de komende uren en dagen. De tarieven kunnen ook voor korte perioden negatief worden, bijvoorbeeld 's nachts als er veel wind staat.

Industriële grootverbruikers die handig inspelen op deze veranderlijke tarieven voor elektriciteit kunnen dus geld verdienen en zo een stabiliserend effect op het net uitoefenen. Maximaal voordeel is er te behalen als:

- flexibiliteit in de belasting gemaximaliseerd is

- opslag van elektriciteit mogelijk is
- eigen generatoren ingezet kunnen worden

In de industrie is het zeker niet ondenkbaar dat de capaciteit van de aansluiting met het openbare elektriciteitsnet vergroot moet worden. Het net zal immers minder gelijkmatig belast worden als het aanbod aan elektriciteit fluctueert.

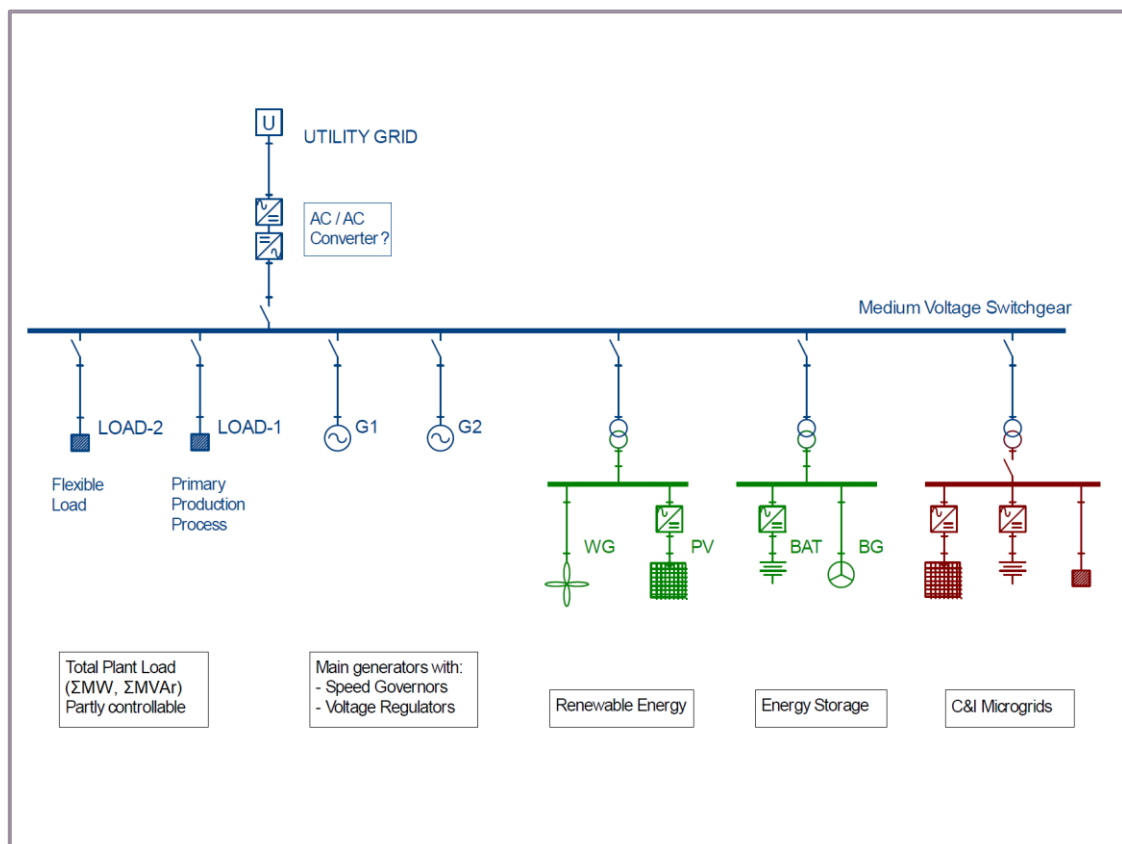
Daarnaast is de grote vraag of het openbare net stabiel blijft. In het huidige openbare net volgt het aanbod van elektriciteit op ieder ogenblik naadloos de vraag. Netbeheerders streven ernaar de frequentie van het openbare net in Europa op exact 50 Hz te houden. Dreigt de frequentie iets te zakken, dan wordt er meer vermogen in het net gebracht. Stijgt de frequentie, dan moet er minder vermogen geleverd worden.

Dat gaat trouwens niet altijd goed. Al langere tijd is de frequentie van het Europese net te laag, doordat Servië en Kosovo ruziën wie extra vermogen moet leveren. Het gevolg dat klokken in Europa achter lopen is nu nog niet zo ernstig.

Maar de grote hoeveelheden windenergie uit Noord Duitsland en Denemarken en alle toekomstige projecten in Europa die gebruik maken van zonne- of windenergie kunnen voor grotere problemen gaan zorgen. Kan het net nog op elk moment voldoende elektrisch vermogen leveren of opnemen? Blijft de frequentie hard of zijn grotere fluctuaties acceptabel? Blijft het net stabiel of wordt het een storingsbron?

Voeding, opslag en belasting in het industriële net van de toekomst

Het is niet te voorspellen hoe het industriële elektriciteitsnet er in 2050 precies uit gaat zien. Er zijn vele ontwikkelingen in de energieopwekking en opslag en het is helemaal de vraag welke ontwikkeling of doorbraak gaat winnen. Maar bedrijven zullen zeker proberen om het bestaande middenspanning systeem te handhaven. Door lokale opwekking zullen er meer kleine voedingsbronnen in het net komen. Systemen voor elektrische energieopslag zullen worden toegevoegd en soms als voeding en soms als extra belasting werken. Complexiteit van regelingen en beveiligingen in het net zal toenemen. Onderstaand grondschema bevat voedingen, opslag en belasting die naar alle waarschijnlijkheid in de toekomst deel gaan uitmaken van industriële elektriciteitsnetten.



T.o.v. het grondschema in de huidige mogelijke voedingen en belasting van het industriële elektriciteitsnet zijn de veranderingen:

- belasting is opgesplitst (LOAD-1 en LOAD-2)
- dieselgenerator verwijderd
- AC/AC omvormer tussen het openbare en industriële net
- opwekking van duurzame energie
- energieopslag
- commerciële en industriële microgrids (C&I Microgrids)

Toenemende en deels flexibele belasting

Een deel van de belasting zal flexibel en regelbaar worden (LOAD-2). Daarbij kan de flexibiliteit in de belasting worden gedefinieerd als de mate waarin een bedrijf de elektriciteitsinvoer en/of -uitvoer kan variëren zonder het primaire productieproces (LOAD-1) te verstoren. Natuurlijk maken industriële bedrijven nu vaak al onderscheid tussen meer en minder preferente groepen, maar dat is meer voor noodgevallen bedoeld.

De totale belasting zal waarschijnlijk toenemen doordat naar verwachting ook warmte (deels) elektrisch zal worden opgewekt. Denk daarbij aan hybride boilers, warmtepompen, elektrische fornuizen, elektrisch smelten van schroot, het elektrificeren van mechanische aandrijving en elektrolyse.

Opwekking met eigen generatoren

Er zijn nog steeds twee generatoren getekend (G1, G2), maar of het is niet te voorspellen of aantal generatoren gaat toenemen of afnemen. Als de vraag naar stoom afneemt, is het logisch dat ook het aantal generatoren met stoomturbines zal afnemen. Aan de andere kant kunnen extra generatoren met gasmotoren of

gasturbines die op een groene brandstof werken wenselijk zijn om te stabiliteit te handhaven.

De vraag is of investering in gasturbine-generatoren zichzelf terug zal verdienen. In principe leveren ze alleen geld op wanneer het tarief voor elektriciteit erg hoog is. Maar als ze onbelast of gedeeltelijk belast meedraaien, kunnen ze de stabiliteit in het industriële elektriciteitsnet aanzienlijk verbeteren. Met hun massatraagheid, frequentieregeling en reservecapaciteit kunnen ze de frequentie stabiel houden en de balans in actief vermogen (MW) herstellen. En met hun opgeslagen magnetische flux en spanningsregeling kunnen ze de spanning stabiel houden en de balans in reactief vermogen (MVAR) herstellen.

De dieselgenerator (DG) als noodgenerator of voor 'black starts' is verwijderd. Ik ga ervan uit dat de combinatie van duurzame energieopwekking en -opslag deze taak over neemt. Bovendien is het natuurlijk de vraag of dieselolie als brandstof verkrijgbaar blijft.

AC/AC omvormer tussen het openbare en industriële net

Mogelijk wordt er een AC/AC omvormer tussen het openbare en industriële net geplaatst. Dat heeft twee voordelen. Ten eerste zijn de netten ontkoppeld, zodat storingen zoals kortsluitingen en sprongen in frequentie in het openbare net niet in het industriële net doorwerken. Ten tweede wordt de import en export van vermogen beter regelbaar.

Lokale eigen opwekking uit duurzame energiebronnen

De grootste bierbrouwer van Europa, Heineken, heeft al behoorlijk geïnvesteerd in duurzame energiebronnen. Sinds 2016 draaien in Zoeterwoude vier windturbines (12 MW). Op het dak van de brouwerij in Den Bosch en alle

distributiecentra liggen totaal 12 duizend zonnepanelen (3 MWp). Er komt biogas uit de waterzuiveringsinstallaties en de brouwerij in Wijkre maakt gebruik van een waterrad.

Voor eigen opwekking komen vooral windturbines, zonnepanelen (PV cellen) en generatoren in de Nederlandse industrie in aanmerking. Zonnepanelen leveren weliswaar relatief weinig vermogen voor industriële grootverbruikers, maar met een rendement dat nog steeds snel toeneemt en een terugverdientijd van enkele jaren staan ze in 2030 waarschijnlijk wel op de daken van de meeste industriële bedrijven. Windturbines die op het fabrieksterrein of in de buurt staan, kunnen wellicht direct aan het industriële net gekoppeld zijn.

Lokale elektrische energieopslag

Lokale elektrische energieopslag lijkt mij onvermijdelijk, maar de omvang is niet te overzien. Het hangt af van de vele ontwikkelingen in de energieopwekking en -opslag, van de mate waarin de netbeheerder investeert in elektrische energieopslag, van de flexibiliteit van de belasting die kan worden behaald en van of de hoge temperatuurwarmte elektrisch gaat worden opgewekt of niet.

Microgrids

De Amerikaanse overheid definieert microgrids als volgt:

A microgrid is a group of interconnected loads and distributed energy resources (DERs) within clearly defined electrical boundaries that acts as a single controllable entity with respect to the grid. A microgrid can connect and disconnect from the grid to enable it to operate in both connected or island-mode.

Een microgrid is dus een duidelijk elektrisch begrensd net met lokale opwekking (b.v. windturbines, brandstofcellen, PV cellen), elektrische energieopslag (b.v.

vliegwielen, batterijen) en flexibele, bestuurbare belastingen. Een microgrid kan gekoppeld worden aan het hoofdnetwerk, maar ook in eilandbedrijf werken. Een microgrid heeft zijn eigen besturingssysteem.

Grote voordelen van commerciële en industriële (C&I) microgrids zijn:

- Mogelijkheid om duurzame energiebronnen te integreren zonder het gehele elektrische distributienet opnieuw te ontwerpen.
- Betrouwbaarheid en beschikbaarheid. Microgrids bepalen zelf wanneer ze overschakelen naar eilandbedrijf en kunnen daarmee een onderbreking van de stroomtoevoer vermijden. Ze regelen de belasting en kunnen zeker stellen dat essentiële processen gevoed blijven.
- Economische optimalisatie is mogelijk in gekoppeld bedrijf. Microgrids bepalen immers zelf wanneer ze elektriciteit importeren of exporteren

De ontwikkeling van C&I microgrids staat nog in de kinderschoenen. Een grote uitdaging is het ontwikkelen van een betaalbaar, stabiel regel- en beveiligingssysteem. Verder is er nog weinig proven-design en standaardisatie.

Bedrijfsvoering in het industriële net van de toekomst

Een betrouwbare, stabiele industriële elektriciteitsvoorziening van voldoende kwaliteit (power quality) gaat een hele uitdaging worden met de toekomstige veranderingen in het industriële net, zoals:

- Grote fluctuaties in de aangeboden duurzaam opgewekte elektriciteit uit het openbare net en lokaal
- Elektrische energieopslag op meerdere plaatsen in het eigen net. Deze opslag kan voeding, maar ook belasting zijn (bi-directioneel vermogen)
- Lagere massatraagheid in het net, dus hogere frequentiesprongen
- Flinke toename van variabele belastingen

Nu is de normale bedrijfsvoering van bijna alle industriële elektriciteitsnetten gebaseerd op gekoppeld bedrijf met een hard, stabiel openbaar net. Daarnaast kunnen sommige industrieën met eigen opwekking ook in eilandbedrijf draaien.

Hoe gaat de bedrijfsvoering veranderen?

Om te begrijpen hoe de bedrijfsvoering gaat veranderen, zijn in onderstaand tabel eerst de evenwichtsvergelijking van het actieve vermogen opgesomd voor de verschillende typen bedrijfsvoering nu en in de toekomst.

Type bedrijfsvoering	Evenwichtsvergelijking actief vermogen	
	Heden	Toekomst
Geen eigen opwekking	$\underline{P}_L = P_U$	$\underline{P}_{L1} + P_{L2} = \underline{P}_U + \underline{P}_{RES} \pm P_{ES}$
Alleenstaand bedrijf	$\underline{P}_L = P_G$	$\underline{P}_L = P_{G1} + \underline{P}_{RES} \pm P_{ES}$
Gekoppeld bedrijf	$\underline{P}_L = P_{G1} + P_{G2} \pm P_U$	$\underline{P}_{L1} + P_{L2} = P_{G1} + P_{G2} \pm \underline{P}_U + \underline{P}_{RES} \pm P_{ES}$
Eilandbedrijf	$\underline{P}_L = P_{G1} + P_{G2}$	$\underline{P}_{L1} + P_{L2} = P_{G1} + P_{G2} + \underline{P}_{RES} \pm P_{ES}$

Hierbij is

- P_L het totale gevraagde vermogen
- P_{L1} het totale gevraagde vermogen voor het primaire productieproces
- P_{L2} het totale flexibele gevraagde vermogen
- P_{Gx} geleverd vermogen door eigen generatoren uit brandstof of stoom
- P_U opname of afgifte van vermogen uit het openbare net (U = Utility)
- P_{RES} geleverd vermogen door eigen duurzame opwekking
(RES = Renewable Energy Sources)
- P_{ES} opname of afgifte van vermogen uit opslag (ES = Energie Storage)

In het linker lid van de evenwichtsvergelijking staat steeds de vraag naar vermogen en rechts het aanbod. De vet gedrukte, onderstreepte vermogens zijn min of meer dwingend. Alleen als er evenwicht is tussen gevraagd en geleverd actief vermogen (MW), is de frequentie in het industriële net gelijk aan de nominale frequentie (50 Hz). Is de frequentie te hoog, dan is er teveel vermogen en is de frequentie te laag dan is er tekort aan vermogen.

Voor het reactieve vermogen kunnen soortgelijke evenwichtsvergelijkingen worden opgesteld. Als de spanning in het industriële net gelijk is aan de nominale spanning (bijvoorbeeld 11 kV), dan is er evenwicht tussen gevraagd en geleverd reactief vermogen (MVar). Ik ga er echter vanuit dat het handhaven van het evenwicht van actief vermogen het lastigst is en daarom ga ik hier niet verder op het reactief vermogen in.

Geen eigen opwekking

Bedrijven die nu alleen een aansluiting met het openbare net hebben en geen eigen generatoren zullen afhankelijk van de weersomstandigheden soms hoge tarieven voor hun elektriciteit betalen. Voor deze bedrijven wordt het waarschijnlijk rendabel om het totale gevraagde vermogen op te delen in

vermogen voor het primaire productieproces en flexibele vraag. Verder kan het voor deze bedrijven interessant zijn om te investeren in eigen duurzame opwekking, zoals zonnepanelen (PV) of energieopslag. Ook is er wat regelapparatuur nodig om automatisch zo economisch mogelijk te draaien.

Alleenstaand bedrijf

Op plaatsen waar nu één dieselgenerator wordt gebruikt, kan deze vervangen worden door een generator die werkt op een groene brandstof, door een batterij eventueel met zonnepanelen of door een brandstofcel. De belasting opdelen zal meestal niet zinvol zijn en de regeling blijft eenvoudig.

Gekoppeld bedrijf en eilandbedrijf

De bedrijfsvoering van industriële bedrijven met eigen generatoren gaat zich waarschijnlijk ontwikkelen naar een soort eilandbedrijf, waarbij gedoseerd vermogen uitgewisseld kan worden met het openbare net en eventueel ook met de eigen microgrids. Het openbare net zal economisch (en misschien ook technisch) niet meer gebruikt kunnen worden om op ieder moment de vraag en aanbod van elektriciteit kloppend te maken. Daarnaast is eilandbedrijf een methode om dynamische en stationaire stabiliteit, betrouwbaarheid, beschikbaarheid en voldoende kwaliteit in eigen hand te houden.

Bedrijfsvoering gaat een stuk ingewikkelder worden, want:

- een deel van de belasting wordt regelbaar
- er komt waarschijnlijk een vorm van energieopslag
- het openbare net en eigen duurzame opwekking worden weersafhankelijk

Evenwichtsverstoringen ontstaan niet alleen meer door wisselende vraag van de verbruikers, uitval van voedingsbronnen of storingen in het distributienet, maar

ook door wisselend aanbod van elektriciteit door de voedingsbronnen. Daarom is er voor de bedrijfsvoering een uitgebreid geautomatiseerd regel- en beveiligingssysteem nodig.

Initiële respons

Als het aantal generatoren in het net af zou nemen, zal dat de initiële frequentieverandering (Engels: *rate of change of frequency, RoCoF*) en de initiële spanningsdip of piek vergroten. Daarom moet de initiële respons goed in de gaten worden gehouden en zo nodig moeten er maatregelen worden getroffen.

Primaire, secundaire en tertiaire regelingen

De toerenregelaars van de aandrijvingen en de spanningsregelaars van alle generatoren reageren gezamenlijk. Maar de regelingen van de andere bronnen mogelijk niet. Blijft het generatorvermogen groot t.o.v. de andere bronnen, dan geeft dat geen problemen. Zo niet, dan moet het power management systeem snel andere wenswaarden aan de regelingen van de voedingsbronnen en opslag geven. De functie van de secundaire en tertiaire regelingen zullen naar mijn mening niet noemenswaardig veranderen.

Automatisering in het industriële elektriciteitsnet

Op dit moment is niet te voorspellen hoe de automatisering in het industriële elektriciteitsnet er in 2050 uit zal zien.

Toch kunnen er al wel eisen aan de automatisering worden gesteld:

- Secundaire en tertiaire regeling voor frequentie, spanning en lastverdeling (MW, MVAR). Maar daarbij zijn niet alleen meer generatoren en het net betrokken, maar ook duurzame voedingsbronnen.
- Automatisch af- en bijschakelen van voedingsbronnen

- Automatisch af- en bijschakelen van belasting tijdens normaal bedrijf (Engels: *slow load shedding*), zodat het systeem in leven gehouden wordt
- Automatisch import en export regelen. Dit geldt zowel voor het openbare net als voor lokale opslag.
- Afschakelen van belasting bij plotselinge uitval van een grote voedingsbron (Engels: *fast load shedding*)
- Blokkeren inschakelen van grote motoren als te weinig generatoren draaien
- Synchronisatie aan het openbare net, maar ook van eilandnetten onderling.
- Naadloos schakelen tussen gekoppeld bedrijf en één of meer eilanden
- Preventieve beveiliging tegen overbelasting van netcomponenten , zoals transformatoren en kabels.
- Gecoördineerde schade-beperkende beveiliging gedurende alle mogelijke situaties, zowel in gekoppeld bedrijf als in eilandbedrijf
- Monitoring van o.m. frequentie, spanning, vermogens en standen schakelaars
- Cyber security gedurende de gehele levenscyclus van het systeem
- Communicatie met SCADA systemen
- Hoge betrouwbaarheid, beschikbaarheid en onderhoudsvriendelijkheid
- Eindgebruikers moeten zelf storingen kunnen zoeken en hun systeem zelf eenvoudig kunnen testen
- Architectuur moet overzichtelijk en begrijpelijk blijven

Voor de realisatie van de automatisering bestaan twee uitersten: een gecentraliseerd of een gedecentraliseerd regel- en beveiligingssysteem. Een gecentraliseerde systeem vereist een zeer grote hoeveelheid informatieoverdracht (digitaal of via koperen verbindingen) tussen de betrokken eenheden en is daarom op zijn minst gezegd onhandig, maar mogelijk zelfs onhaalbaar. In een volledig gedecentraliseerde systeem wordt elke eenheid bestuurd door een lokale regeling zonder de situatie van anderen te kennen. Er is

echter een sterke koppeling tussen de activiteiten van verschillende eenheden in het systeem. Daarom kan de primaire regeling en alle beveiliging het beste lokaal gebeuren en de rest van de automatisering gecentraliseerd.

Regelsystemen

De gecentraliseerde regeling zal uit een uitgebreid Power Management System (PMS) bestaan. Het PMS gaat wellicht veel lijken op een Micro Grid Control System (MGCS) met wat aanpassingen. MGCS systemen ontwikkelen zich momenteel razendsnel en standaardisatie is in ontwikkeling (IEEE Std 2030 reeks).

De gecentraliseerde regelingen zullen bestaan uit de regelingen van de generatoren, van de duurzame voedingsbronnen en wellicht ook van regelbare belastingen.

Beveiligingssysteem

De functies van het beveiligingssysteem in het industriële elektriciteitsnet zijn:

- Schade voorkomen of beperken
- Hinder aan het net beperken
- Persoonlijke veiligheid waarborgen

Beveiligingsfuncties zijn grofweg in twee groepen te verdelen: schade-beperkende beveiligingen en preventieve beveiligingen. Schade-beperkende beveiligingen spreken aan als er al schade is, zoals bijvoorbeeld bij een kortsluiting. Preventieve beveiligingen monitoren stroom, spanning of temperatuursensors en voorkomen schade en snelle veroudering. Preventieve beveiligingen hebben een alarm en een trip niveau of alleen alarm.

Veel preventieve beveiligingen spreken nu aan als een netcomponent (transformator, kabel e.d.) overbelast dreigt te worden. Maar enige overbelasting toestaan kan in sommige bedrijfsomstandigheden heel wenselijk zijn. Zelfs als het de levensduur van het component enigszins zou verkorten. Preventieve beveiligingen zouden daarom best een geïntegreerd onderdeel van het besturingssysteem kunnen worden.

Communicatiesysteem en informatieoverdracht

Bij een volledig gecentraliseerd regel- en beveiligingssysteem zouden vanuit de schakelaars en elektrische machines zeer veel signalen hard-wired overgedragen moeten worden, zoals:

- Spanningen en stromen uit de meettransformatoren
- Temperatuursensors, trillingsopnemers
- Digitale input en output contacten (statussen, commando's)

Met gebruik van geschikte relais, regelapparatuur en andere IEDs (Intelligent Electronic Devices) en de juiste manier van digitale communicatie zijn analoge meetsignalen en statussen bekend bij het PMS. Ook kan het PMS componenten zoals schakelaars van afstand bedienen.

Vraag is natuurlijk welke methode van digitale communicatie in de toekomst gebruikt gaat worden. Vermoedelijk gaan IEDs communiceren volgens de IEC61850 standard die begin deze eeuw ontwikkeld is. Doordat deze manier van communicatie werkt met ethernet of glasvezel verbindingen en het IP/TCP protocol wordt gebruikt, is het gemakkelijk op te nemen in een automatiseringssysteem. De methode en de gebruikte apparatuur zijn bovendien al proven design.

Ontwikkelingen in energievoorziening zijn nog onduidelijk

Hoe het industriële elektriciteitsnet er in 2050 precies uit gaat zien, is niet te zeggen. Reden is de vele ontwikkelingen in de energieopwekking en -opslag. Eén ding is zeker: onbeperkt aardgas, olie of kolen verbranden is een gepasseerd station. Een openbaar elektriciteitsnet dat alle tekorten onmiddellijk aanvult en alle overschotten opneemt ook.

Het volledig verdwijnen van de aansluiting met het openbare gasnet voor 2050 lijkt me voor de procesindustrie erg ambitieus. Enerzijds zal dan voor deze grootverbruikers veel energie moeten worden opgeslagen en anderzijds zijn nieuwe technieken nodig om de proceswarmte op te wekken.

De energietransitie voor industriële grootverbruikers is het eenvoudigst als er op grote schaal een betaalbare, veilige en betrouwbare groene brandstof beschikbaar komt en kan worden aangeboden via het openbare gasnet. Deze bedrijven kunnen dan midden of hoge temperatuurwarmte produceren met bestaande technieken. Het plaatsen van één of enkele generatoren, aangedreven door gasmotoren of gasturbines, kan een oplossing zijn voor een eigen betrouwbare, stabiele elektriciteitsvoorziening.

Een tweede optie is om midden of hoge temperatuurwarmte te produceren met elektriciteit, maar daarvoor is nieuwe technologie nodig. Gevolg is verregaande industriële elektrificatie en een veel zwaardere aansluiting aan het openbare net. De vraag naar energie van de industriële grootverbruikers is immers zo groot, dat deze energie mijns inziens maar voor een zeer beperkt deel lokaal kan worden opgewekt en opgeslagen.

Een derde optie is wellicht om midden of hoge temperatuurwarmte te produceren met aardwarmte. Maar met 30 à 35°C per km is het water op 3 km diepte nog maar zo'n 100°C. Toch heeft een gespecialiseerd bedrijf als Ormat in verschillende Europese landen al geothermische elektriciteitscentrales geleverd.

Ten slotte wil ik opmerken dat bijna iedereen ervan uit gaat dat de energietransitie veel geld zal kosten. Ik ben daar niet van overtuigd. Decennia lang waren fossiele brandstoffen goed te betalen en was er geen probleem. Nu wereldwijd heel veel mensen noodgedwongen over de problematiek nadenken en veel ontwikkelingen gaande zijn, kunnen er plotseling technologische doorbraken komen.

Hoeveel softwareontwikkelaars hebben de vorige eeuw niet zitten tobben met schaarse computermiddelen, zoals geheugen, rekenkracht en bandbreedte? Door stormachtige technologische ontwikkelingen zijn deze zaken bijna gratis geworden of in ieder geval zo goedkoop dat het er niet meer toe doet. Waarom zou dat met energieopwekking en -opslag niet kunnen?

Duidelijke trends en tips

Het is niet te voorspellen hoe het industriële elektriciteitsnet er in 2050 precies uit gaat zien. Toch zie ik er wel enkele duidelijke trends, waarmee bij vervanging of uitbreiding van het industriële elektriciteitsnet rekening gehouden kan worden.

1. Omvang industriële elektriciteitsnet neemt toe

De omvang van het industriële elektriciteitsnet gaat toenemen, enerzijds door toenemende elektrificatie en anderzijds door grotere schommelingen in het aanbod van elektriciteit. Houd bij de vervanging of uitbreiding van het industriële elektriciteitsnet daarom nu al rekening met de groei van het net.

2. Vraag naar elektriciteit wordt flexibel en regelbaar

Flexibiliteit in de vraag naar elektriciteit wordt noodzakelijk en gaat geld besparen. Maak de vraag naar elektriciteit daarom zoveel mogelijk flexibel en regelbaar.

3. Belang opslag van elektriciteit neemt toe

Investeren in opslag van elektriciteit kan economisch heel interessant zijn bij een per uur veranderend tarief, vooral als de vorm van opslag heel goed in het productieproces past. Opslag kan elektrisch zijn, maar ook warmte of gas. Voor het genereren van middelhoge temperaturen is de verwachting dat hybride of tweevoudige systemen (die draaien op zowel elektriciteit en gas) de gasgestookte boilers gaan vervangen.

4. Automatisering in het industriële elektriciteitsnet neemt verder toe

Doordat het industriële elektriciteitsnet meer voedingsbronnen, opslag en flexibele belasting krijgt, moet er veel meer gemeten en geregeld worden. De automatisering en ICT zal dus steeds verder toenemen. Het lijkt mij daarom

verstandig om voor nieuwe en vervangende beveiligingsrelais in de schakelinstallaties *Intelligent Electronic Devices* (IEDs) te kiezen met functionaliteit voor beveiliging, meting en besturing. De IEDs communiceren bij voorkeur volgens de IEC61850 standard. Deze manier van communicatie is gemakkelijk op te nemen in een automatiseringssysteem, omdat het werkt via ethernet of glasvezel verbindingen en het bekende internet (IP/TCP) protocol gebruikt wordt.

5. Andere manier van denken

De energietransitie eist een andere manier van denken over vraag en aanbod. We zijn al generaties lang gewend om fossiele brandstoffen te verbranden op het moment dat er energie nodig is. De aanbod van warmte en elektriciteit past zich daarbij op ieder moment aan de vraag aan. Als we in Nederland voornamelijk inzetten op zonne- en windenergie, zal niet de vraag naar energie leidend meer zijn, maar het aanbod.