

Koppelregeling van variabel-toeren windturbines

P. Schaak

Abstract

Bij conventioneel bedreven variabel-toeren turbines is het mogelijk gebleken de generatorregeling zodanig aan te passen, dat:

1. de productie-dips, die bij boven-nominaal turbine bedrijf voorkomen, worden geëlimineerd;
2. de turbine tijdens de transitie van deellast - naar vollast bedrijf (en vise versa) meer produceert.

Met gebruikmaking van in de literatuur teruggevonden werkwijzen kan dit de productie met ordegrootte 0.8 % respectievelijk 0.7 % verhogen. Hieraan hebben toegevoegd i) een werkwijze die de voor dip-eliminatie benodigde toename van het generatorkoppel halveert en ii) een werkwijze waarbij de productie tijdens de transitie nog verder kan worden verhoogd (opnieuw ordegrootte 0.7 %). Deze laatste toevoeging is nog onzeker en zal slechts kunnen worden gebruikt voor offshore turbines.

De verbeterde werkwijze voor eliminatie van productie-dips is reeds in generieke vorm in ECN's ontwikkelomgeving voor windturbinereregelingen opgenomen. Hiermee zijn 2 regelingen voor commerciële windturbines ontworpen, die met verschillende aërodynamische codes (waaronder Phatas) zijn beproefd.

Verantwoording

Het hier beschreven werk is uitgevoerd binnen een project dat mede mogelijk is gemaakt door ondersteuning van het Programma Duurzame Energie in Nederland, dat wordt uitgevoerd door NOVEM in opdracht van het ministerie van Economische Zaken (contractnummer 2020-01-12-10-003).

INHOUDSOPGAVE

1	Introductie	5
2	Conventionele koppelregeling	6
3	Literatuur	7
4	Nieuwe technieken	8
4.1	Vollastkromme	8
4.2	Deellastkromme	10
5	Potentieel	12
5.1	Regelaarontwerp	12
5.2	Simulaties	20
5.3	Verificatie	31
6	Conclusies en aanbevelingen	32

1 INTRODUCTIE

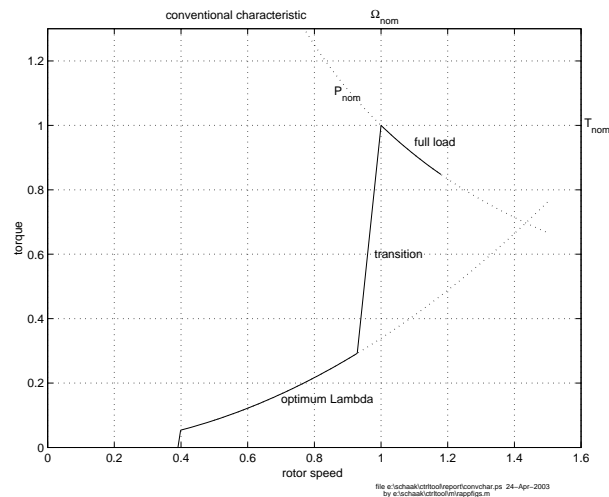
Bij turbines met een conventioneel geregeld generatorkoppel komen productie dips voor, terwijl er sprake is van boven-nominale windsnelheden. Hoewel het uit de literatuur bekend is dat deze dips kunnen worden geëlimineerd, is er onder de huidige generatie turbines toch sprake van dit ongewenste verschijnsel. Tijdens de hier beschreven studie hebben we de toepasbaarheid van de uit de literatuur bekende oplossing onderzocht en geprobeerd te verbeteren.

Uit de literatuur is ook bekend dat de productie bij een conventioneel geregeld generatorkoppel niet optimaal is, wanneer er sprake is van een windsnelheid die te laag is voor vollast bedrijf, maar te hoog voor optimum Lambda bedrijf (als optimum Lambda bedrijf zou leiden tot een te hoog toerental). Regeling van het generatorkoppel om de productie onder deze omstandigheden te verhogen is het tweede onderzoeks-item in dit rapport.

In hoofdstuk 2 is beschreven op welke wijze het generatorkoppel conventioneel wordt geregeld. Hoofdstuk 3 duidt de uit de literatuur bekende methoden waarvolgens het conventionele bedrijf zou kunnen worden verbeterd. De werkwijzen die wij daaraan hebben toegevoegd beschrijven we in hoofdstuk 4. Hoofdstuk 5 beschrijft ontworpen regelalgoritmen betreffende de onderzochte werkwijzen en de hiermee uitgevoerde simulaties. In hoofdstuk 6 zijn de uit de studie volgende conclusies en aanbevelingen samengevat.

2 CONVENTIONELE KOPPELREGELING

Het elektrisch koppel in variabel toeren turbines wordt conventioneel geregeld aan de hand van de koppel-toeren karakteristiek van figuur 1 [3]. (Zowel koppel als toeren zijn genormeerd op hun nominale waarden). De basis van deze karakteristiek zijn de (deels gestippelde) krommen voor optimum Lambda - en vollast bedrijf. De optimum Lambda kromme volgt uit het maximaliseren van het aërodynamisch rendement. Met de vollast kromme wordt een constante (maximaal toelaatbare) vermogensafname gerealiseerd: P_{nom} .



Figuur 1: Conventionele koppel-toeren karakteristiek

Als gevolg van de begrenzing door langdurig gemiddelde - en momentane maxima voor koppel, toerental en vermogen, kunnen de 2 krommen in het algemeen niet op elkaar worden aangesloten op het punt waar zij zouden kruisen. Dientengevolge is er sprake van de transitie. Door ook een minimum toerental voor de productie in acht te nemen, is figuur 1 ontstaan.

In vollast ligt de streefwaarde van het bladhoek-geregelde toerental hierbij op of iets boven het nominale toerental: bij een af- of toename van het toerental als gevolg van de veranderende wind, wordt de bladhoek zodanig versteld dat de afwijking van de streefwaarde teniet wordt gedaan. Bij afvallende wind vindt dit plaats, totdat het aan de luchtstroom onttrokken vermogen niet meer door bladhoekverstelling kan worden verhoogd. Daarna zal de rotor vertragen en het transitie gedeelte van toepassing worden.

Bij toepassing van bovenstaande inverse karakteristiek komt het voor, dat de afname van het toerental nog wel door bladhoekverstelling teniet kan worden gedaan, maar dat dit niet zodanig snel kan worden gerealiseerd dat het toerental (boven) nominaal blijft. Hierdoor zal het toerental (en dus ook het elektrisch koppel en - vermogen) soms beneden nominaal zakken, terwijl dit voor de gegeven windsnelheid niet noodzakelijk is. Dit is een verschijnsel dat onder de huidige generatie van commerciële turbines voorkomt [4].

3 LITERATUUR

Een aantal van de hier voorgestelde verbeteringen bij het regelen van het elektrisch koppel zijn reeds beschreven door Bossanyi [2][1]. Dit hoofdstuk beschrijft welke verbeteringen dit betreft.

De productie-dips bij conventionele koppelregeling kunnen worden voorkomen, door bij achterblijvende bladhoekverstelling de vollast vermogensopname van de generator te continueren: de vollast kromme wordt beneden het nominale toerental doorgetrokken. Zolang het optoeren middels bladhoekverstelling niet is uitgeput, zal de bladhoekregeling het toerental even later weer doen terugkeren tot (boven) nominaal zonder dat er sprake is geweest van beneden nominale vermogensopname. Raakt optoeren middels bladhoekverstelling wel uitgeput, dan wordt overgestapt op transitie naar de optimum Lambda kromme. Afhankelijk van het toerental waarbij de transitie wordt binnengetreten, dient het transitie gedeelte gradueel te worden bijgesteld naar conventioneel bedrijf of nog iets hogere toerentallen.

De transitie kan tot iets hogere toerentallen worden verschoven, omdat de aansluiting op de vollast kromme nu boven de streefwaarde van de bladhoekregeling kan liggen (wat bij de conventionele karakteristiek met eenduidige ‘mapping’ natuurlijk is uitgesloten). Het voordeel hiervan is dat de transitie dicht bij optimum Lambda bedrijf plaatsvindt, zodat de turbine een hogere productie kent. Dit principe wordt nog verder uitgebuit als gedurende de gehele transitie het toerental wordt nagestreefd, waarbij het binnentreden van vollast plaatsvindt. Dit is eenvoudig te realiseren met een PI-regelaar.

Naast het in vollast bedrijven bij een constant vermogen, kan ook worden gekozen voor een constant (maximaal) koppel. De vollastkromme van figuur 1 is dan een horizontale lijn.

4 NIEUWE TECHNIEKEN

Naast de technieken die we in de literatuur hebben teruggevonden of daaruit overgenomen, zijn er ook 2 technieken onderzocht waarvoor geen referenties zijn aangetroffen. Het betreft:

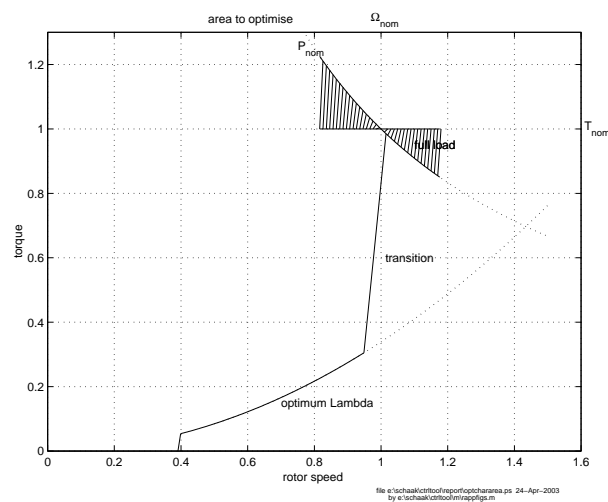
1. de vollastkromme tussen de lijnen voor constant koppel of constant vermogen;
2. de deellastkromme bij boven-nominale toerentallen.

De volgende 2 paragrafen zijn hier respectievelijk aan gewijd.

4.1 Vollastkromme

Door het juiste toerental als streefwaarde te kiezen, kan voor elke (voldoende lange) vollastkromme die de nominale vermogenslijn snijdt, het gemiddeld geproduceerde vollastvermogen op nominaal worden geregeld. Daar er in vollast sprake is van een bladhoek-geregeld toerental, zal het doorlopen toerentalbereik hiermee nauwelijks worden beïnvloed: grofweg wordt het doorlopen toerentalbereik beperkt door de bladhoekregeling; de koppel-toeren karakteristiek bepaalt de daarbij optredende koppels en vermogens. Met de keuze van de vollast kromme kunnen we dus wel het doorlopen koppel- en toerenbereik beïnvloeden (zo hebben we al gezien dat we kunnen kiezen voor een constant koppel of constant vermogen).

Afhankelijk van de beperkingen waaraan een turbine dient te voldoen, ligt de optimale vollast kromme ergens in het gearceerde gebied van figuur 2. Een andere keuze zal leiden tot een toename van zowel het doorlopen koppelbereik, als het doorlopen vermogensbereik, zonder dat we daar iets voor terug krijgen. (De bij ongewijzigde bladhoek stabiliserende werking van een relatief steil stijgende koppel-toeren curve leidt hier dus niet tot verbeterd gedrag). In het gearceerde gebied echter, kunnen deze bereiken tegen elkaar worden uitgewisseld.

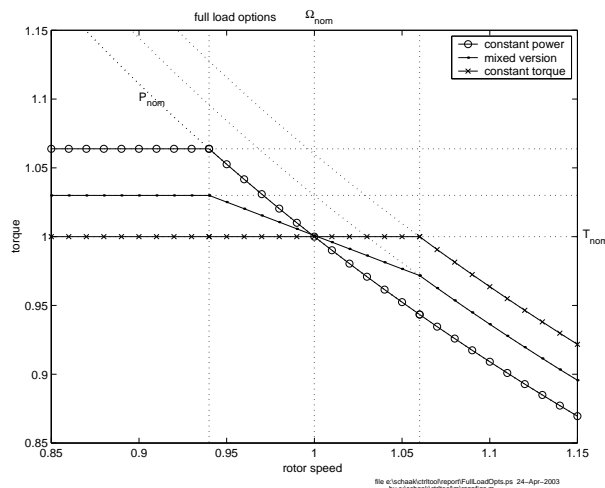


Figuur 2: Optimalisatie gebied voor vollastbedrijf

Merk op dat de figuur uitgaat van een conventioneel verloop van de transitie tussen optimum Lambda- en vollast bedrijf dat, ten opzichte van conventioneel, naar hogere toerentallen is verschoven.

Met betrekking tot een bereik waarbinnen de bladhoekregeling het toerental in vollast vrijwel beperkt, staan in figuur 3 drie opties afgebeeld: constant vermogen, constant koppel en een

tussenvorm hiervan. Alle 3 opties kennen een begrenzing van het koppel of vermogen, zoals van kracht is aan de uiteinden van het toerenbereik waartoe het bedrijf vrijwel is beperkt. De tussenvorm is gekozen op basis van een gelijkwaardig bereik voor koppel en vermogen (gelijk percentage van de nominale waarden).



Figuur 3: Opties voor vollastbedrijf

In geval van de constant vermogen optie beslaat het koppelbereik procentueel hetzelfde bereik rondom nominaal, als waartoe het toerental wordt beperkt. In geval van de constant koppel optie beslaat het vermogen een bereik van deze omvang. Bij toepassing van de tussenvorm, beslaan vermogen en koppel respectievelijk grofweg het halve vermogensbereik van de constant koppel optie en het halve koppelbereik van de constant vermogen optie. Voor alle 3 de gevallen is de streefwaarde voor het toerental gelijk aan het nominale toerental.

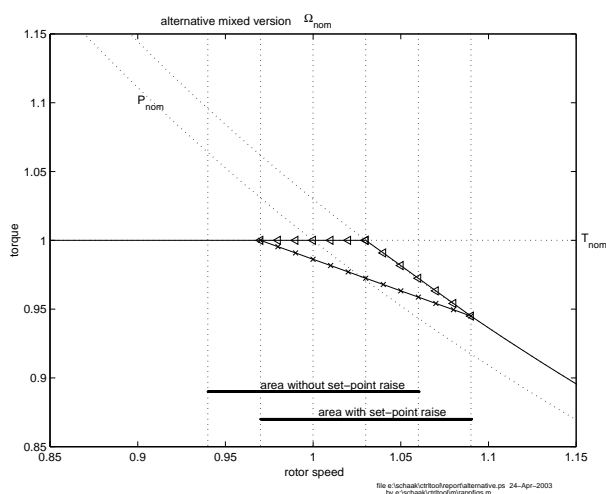
De constant koppel optie zal daadwerkelijk tot een constant koppel leiden, omdat het koppel vrijwel direct door de regeling wordt opgelegd. Bij de constant vermogen optie zou het vermogen pas werkelijk constant zijn, als de koppelregeling het toerental voor alle frequentiecomponenten oneindig snel zou volgen (immers: vermogen is het product van koppel en toerental). Doordat de koppelregeling echter slechts werkzaam is voor de lagere frequenties en er ook sprake zal zijn van een fase-verdraaiing, zal het vermogen altijd fluctueren, hoe de vollast kromme ook wordt gekozen. Met de 'constant' vermogen optie wordt in werkelijkheid dus gekozen voor 'minimale fluctuaties' in het vermogen.

In vergelijking met de constant vermogen optie, blijkt de getoonde tussenvorm de vermogensfluctuaties slechts minimaal te vergroten. De koppelfluctuaties worden ten opzichte van deze optie echter gehalveerd. Of de kromme nog verder 'in de richting van' de constant koppel optie wordt verschoven, is een keuze tussen het toestaan van koppel- danwel vermogensfluctuaties. De getoonde tussenvorm leidt tot gelijkwaardige fluctuatie van koppel en vermogen rondom de nominale waarden.

De relaties tussen koppel, toerental en vermogen zijn niet-lineair. Hierdoor moeten bij de keuze voor een curve anders dan de constant vermogenslijn de streefwaarden van de toeren- en koppelregeling niet (allebei) op nominaal worden gekozen, om het vollastvermogen gelijk te laten zijn aan het nominale vermogen. Dit kan simpel worden opgelost, door de streefwaarde voor het koppel of toerental aan te passen op basis van het waargenomen koppel en toerental. Voor de tussenvorm van figuur 3 zal dit ertoe leiden dat de gemiddelde waarde van de grootte waarvan de streefwaarde wordt aangepast, iets lager komt te liggen. Iets vergelijkbaars gebeurt ook bij toepassing van de constant vermogenslijn. Ook dan leiden niet-lineariteiten ertoe dat

het gemiddelde toerental iets boven - en het gemiddelde koppel iets beneden nominaal ligt.

Bij de keuze van de vollast kromme, moet natuurlijk rekening worden gehouden met beperkingen die worden gesteld aan de langdurige en momentane maxima voor het koppel, het vermogen en de vermogensfluctuaties. Hierdoor kunnen verschillende tussenvormen aantrekkelijk zijn, eventueel in combinatie met een bovennominale streefwaarde voor het toerental (de conventioneel toegepaste beperking van het optreden van productie dips, waarbij het gebruikelijk is de streefwaarde pas bij grotere bladhoeken te verhogen, opdat het momentane maximale toerental niet wordt overschreden). Een realistisch voorbeeld hiervan geven we in figuur 4. Hier zijn het momentaan maximale - en langdurige maximale koppel gelijk gesteld aan het nominale koppel. Het momentaan maximale vermogen is overeenkomstig aan de tussenvorm van figuur 3.



Figuur 4: Alternatieve tussenvorm voor vollastbedrijf

De lijn met driehoekjes is van toepassing zonder verhoging van de streefwaarde, de lijn met kruisjes bij maximale verhoging van de streefwaarde. In het eerste geval is de streefwaarde gelijk aan het nominale toerental, in het tweede geval ligt de streefwaarde halverwege het lijnstuk met de kruisjes. Bij tussenliggende verhogingen van de streefwaarde kan worden gekozen voor een tussenvorm van de 2 lijnen.

Het voordeel van het stellen van deze absolute begrenzing van het koppel is dat de drive train en convertor iets lichter kunnen worden gedimensioneerd. De nadelen ervan zijn dat *i*) er bij geen of beperkte verhoging van de streefwaarde (bij kleinere bladhoeken) beneden nominaal zal worden geproduceerd, *ii*) de streefwaarde van het toerental in vollast meestentijds iets boven nominaal ligt, wat de belastingen zal verhogen en *iii*) de koppelregeling iets complexer wordt.

4.2 Deellastkromme

In deellast vertoont het toerental minder spreiding rondom de streefwaarde dan in vollast. De belangrijkste reden hiervoor is dat het toerental in deellast wordt beperkt door de koppelregeling - en in vollast door de bladhoekregeling. Ook het gegeven dat de wind bij lagere windsnelheden (dus bij deellastbedrijf) minder turbulent is dan bij hogere windsnelheden draagt bij aan de relatief kleine spreiding in deellast.

Des te kleiner de spreiding rondom de streefwaarde is, des te dichter kan de streefwaarde bij het momentaan toelaatbare maximale toerental worden gekozen. Wanneer de streefwaarde in

deellast door dezelfde of een hoger momentaan maximum wordt opgelegd als in vollast, is het dus toegestaan om de transitie op de optimum Lambda kromme te laten aansluiten boven het toerental waarbij de transitie op de vollast kromme aansluit. Het voordeel hiervan is dat de turbine meer gaat produceren: bij toenemend vermogen opereert de turbine langer op de optimum Lambda kromme en tijdens de transitie dichter bij de optimum Lambda kromme.

Bij offshore turbines zal het toerental waarschijnlijk worden begrensd ter beperking van belastingen. Ten opzichte van vollast bedrijf is er bij deellast bedrijf sprake van lagere belastingen (lagere vermogens, lagere windsnelheden en minder turbulentie). Daarom is het voor offshore turbines waarschijnlijk dat in deellast een hogere streefwaarde voor het toerental wordt toegestaan dan in vollast. Voor de onshore situatie is dit niet waarschijnlijk, omdat het toerental daar meestal wordt beperkt omwille van het geproduceerde geluid. Doordat deellastbedrijf plaatsvindt bij relatief weinig omgevingsgeluid, zal het veelal niet zijn toegestaan de geluidsproductie van de turbine bij dit bedrijf hoger te laten zijn dan conventioneel het geval is.

De hier voorgestelde transitie met negatieve richtingscoëfficiënt voor de koppel-toeren kromme, die in absolute zin groter is dan de richtingscoëfficiënt van de constant vermogenslijn, zou kunnen worden geïmplementeerd als 'mapping' van vermogen naar koppel. Een toenemend koppel op basis van een toenemend vermogen leidt namelijk tot een stabiele situatie. (Voor een conventionele 'mapping' van toerental naar koppel geldt dat in dit geval niet [7]). Bij deze studie hebben we ons beperkt tot een eerste scoping van de mogelijkheden op basis van een koppelregeling die is ontworpen voor een transitie bij een constant toerental, waarbij een adaptieve streefwaarde voor het toerental van toepassing is: de streefwaarde wordt bijgesteld op basis van het glijdend gemiddelde van het toegepaste koppel.

5 POTENTIEEL

Om te kunnen inschatten wat het potentieel is van de onderzochte werkwijzen die conventioneel generator bedrijf ontstijgen, hebben we:

- regelaars met de onderzochte functionaliteiten ontworpen en ‘garageversies’ hiervan in de control tool for wind turbines geïmplementeerd;
- deze regelaars toegepast op een exemplarisch model van een multi-megaWatt turbine en de hiermee verkregen simulatieresultaten afgezet tegen de resultaten bij conventionele koppelregeling.

Deze stappen worden respectievelijk in de eerste 2 paragrafen van dit hoofdstuk beschreven. Hiernaast heeft de meest actuele verbetering van de generator karakteristiek beproeving met aërodynamische codes, waaronder Phatas [5], doorstaan. Dit is kort toegelicht in paragraaf 5.3.

5.1 Regelaarontwerp

Het uitgangspunt voor de gebruikte regelaars is een conventioneel geregelde exemplarische multi-megaWatt turbine, waarvan reeds een model in de control tool aanwezig was. Hierin zijn het transitie- en het vollast-gedeelte van de generator-koppelregeling aangepast, om de toegevoegde werkwijzen te analyseren.

Vollast

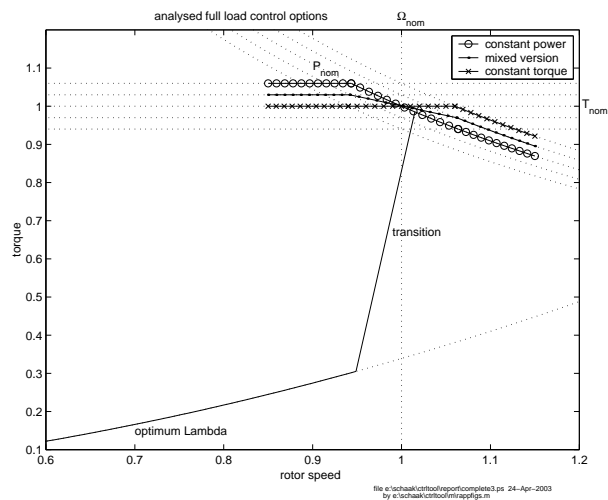
Het scheiden van vollast en deellast in aparte modes met overlap in het toerenbereik is onderzocht voor 3 verschillende uitvoeringen van de vollast regeling:

- constant vermogen;
- constant koppel;
- een tussenvorm van constant koppel en constant vermogen.

De van toepassing zijnde vollastkrommen zijn afgebeeld in figuur 5.

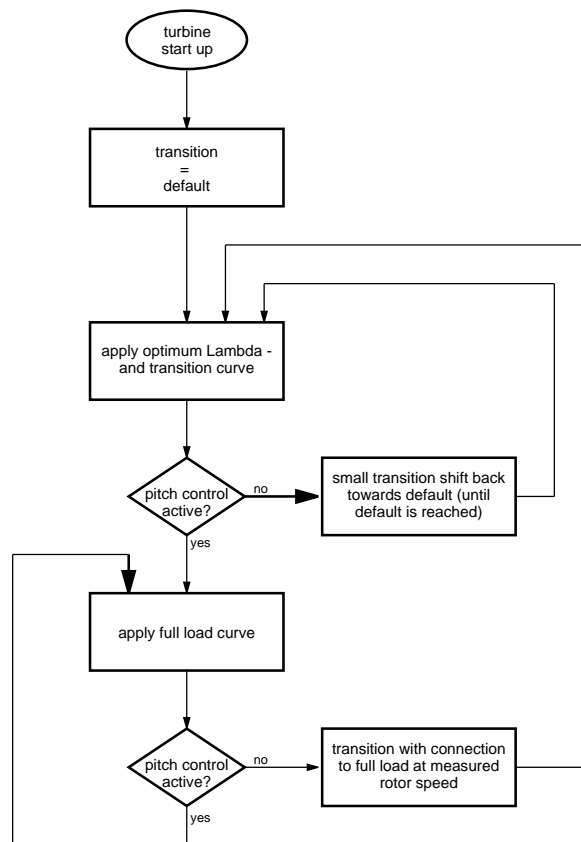
Uitgangspunt bij de tot standkoming van deze krommen is de definitie van een vermogens- en koppelbereik rondom het nominale werkpunt van de turbine, overeenkomstig het toerenbereik waartoe de bladhoekregeling het bedrijf vrijwel beperkt. In dit voorbeeld heeft het toerenbereik een breedte van 12 % van het nominale toerental, zodat de (gestippelde) constant vermogens- en constant koppellijnen van figuur 5 zijn gelegd op nominaal, nominaal +/- 3% en nominaal +/- 6%. Als we de aldus ontstane constant koppel kromme terug rekenen naar het toerenbereik waarvoor de kromme is ontworpen, komen we uit op het nominale toerental +/- 6%. Bij terug rekenen vanaf de andere krommen, verschuift het toerenbereik (bij toenemende spreiding van het koppel) naar iets hogere toerentallen. Dit is eerder gewenst dan problematisch, aangezien het toerental in werkelijkheid ook iets meer boven-nominaal dan beneden-nominaal ligt (als gevolg van de niet-lineaire verbanden tussen koppel, toerental en vermogen).

Voor alle 3 de gevallen is de hierbij toegepaste transitie zodanig geplaatst, dat de transitie op de vollastkarakteristiek aansluit bij het toerental waar de bladhoekregeling ook op vollast overschakelt. Dit zien we terug in figuur 5. De transitie wordt echter niet altijd bedreven zoals de hier afgebeelde ‘default’ transitie. Het gradueel overschakelen naar deellast bedrijf (als optoeren middels bladhoekverstelling is uitgeput) vindt namelijk plaats door de transitie



Figuur 5: Geanalyseerde vollast krommen

te verschuiven: op het moment dat het vollast bedrijf wordt verlaten, sluit de transitie op de vollast kromme aan bij het actueel gemeten toerental. Hierna wordt de transitie per rekenstap van de regelaar een klein stukje teruggeschoven (0.1 rpm/s), totdat de default transitie weer de actuele is. Deze bepaling van het generatorkoppel op basis het gemeten toerental is nader gespecificeerd in figuur 6.



Figuur 6: Stromingsdiagram van de generatorkoppel regeling

Verder zijn de volgende aspecten bij de implementatie in acht genomen:

- Bij deellast bedrijf met een verschoven transitie, waarbij het toerental stijgt tot boven de aansluiting op vollast, wordt de vollast kromme bepalend voor het generatorkoppel. Het terugschuiven van de transitie blijft dan wel actief, zodat de transitie het actuele toerental inhaalt en weer bepalend wordt (tenzij het toerental zover door stijgt, dat de bladhoekregeling actief wordt en er wordt overgeschakeld op vollast bedrijf).
- De transitie wordt niet verder naar lagere toerentallen verschoven, dan het punt waarop de transitie op vollast aansluit bij 93 % van het nominale toerental. Komt het toerental in vollast beneden deze waarde, dan wordt het generatorkoppel berekend volgens deze maximaal verschoven transitie.
- In geval van een verschoven transitie, zijn de aansluitpunten op de optimum Lambda kromme en vollast kromme evenveel toeren verschoven. Dit betekent dat de transitie iets steiler komt te liggen naarmate deze meer is verschoven.
- Het na het verlaten van vollast bedrijf terugschuiven van de transitie kromme vindt plaats met 0.64 % van het nominale toerental per seconde.
- Voor het geval dat de vollast regeling een andere is dan de constant vermogens regeling, wordt de productie nominaal gehouden door de vollastkromme adaptief te verschuiven. Op het volgens de kromme op te leggen generator koppel wordt hiervoor een adaptieve component gesuperponeerd. De maat voor deze component is de afwijking van de nominale productie gedurende de meest recente 60 seconden met vollast bedrijf.

Transitie

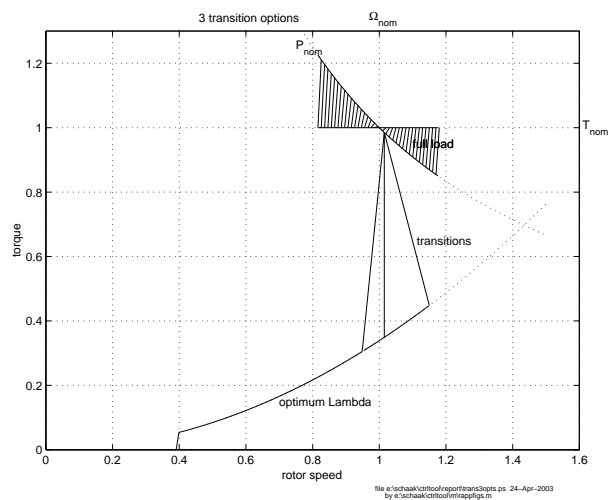
Voor het onderzoek naar de aangepaste transitie kromme zijn 3 verschillende regelingen met elkaar vergeleken. Transitie waarbij het generatorkoppel:

- conventioneel wordt opgelegd conform de transitie zoals afgebeeld in figuur 5;
- wordt bepaald op basis van een koppelgergelde toeren-servo die het toerental constant houdt;
- wordt bepaald op basis van een koppelgergelde toeren-servo die het toerental laat afnemen bij toenemend vermogen.

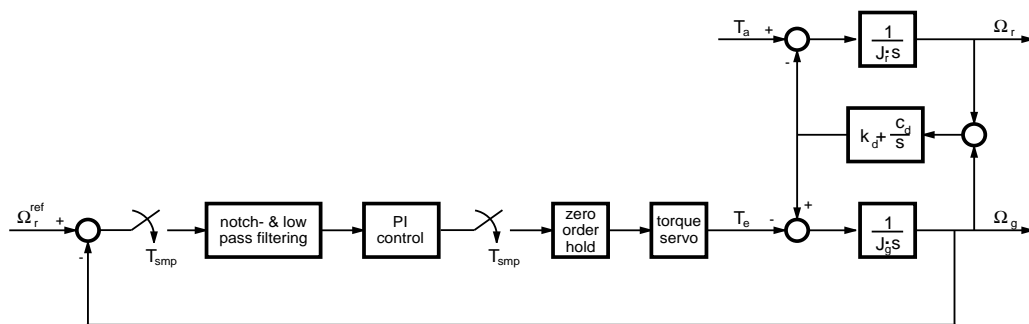
De hiermee nagestreefde mappings van toerental naar generatorkoppel zijn afgebeeld in figuur 7. Merk op dat de gekozen mapping met de negatieve richtingscoëfficiënt slechts een eerste implementatie is voor deze manier van regelen. Er zijn natuurlijk transities denkbaar die nog dichter bij de optimum Lambda kromme liggen (waarbij de constant vermogen lijnen bepalend zijn voor deze afstand).

Bij de servo-regelingen is gebruik gemaakt van een PI-regeling met de proportionele versterking 2 maal zo groot als de integrerende versterking: $K_p = 2 \cdot K_i$ [1]. Het hierbij van toepassing zijnde blokschema is afgebeeld in figuur 8.

Hierin staat Ω voor een toerental en J voor een massa traagheid, met als index g of r voor de generator respectievelijk de rotor. T_a en T_e zijn het aërodynamische koppel en het generator koppel. De drive train flexibiliteit wordt gegeven door de veerconstante c_d en demperconstante k_d . T_{smp} staat voor de bemonsteringstijd waarmee de regeling werkt. De variabele s is de Laplace-operator.



Figuur 7: Generator koppel regeling met 3 verschillende transities



Figuur 8: Blokdiagram servo-geregeld generatorkoppel

Bij de laatstgenoemde regeling is het afnemende toerental gerealiseerd door de streefwaarde van het toerental adaptief te laten afhangen van het gemiddelde generatorkoppel gedurende de laatste minuut. Bij een toenemend gemiddeld generatorkoppel, wordt de streefwaarde van het toerental verlaagd. De middeling van het generatorkoppel vindt plaats met een Moving Average Filter. De aansluiting op de optimum Lambda kromme is 15 % boven het nominale toerental geplaatst (het toerental waarbij de turbine in vollast afschakelt ligt voor dit exemplarische voorbeeld op 18 % boven het nominale toerental).

Stabiliteit

De voorgestelde aanpassing van de vollast regeling heeft geen relevante gevolgen voor de stabiliteit van de geregelde turbine. De stabiliteit wordt gegarandeerd door de bladhoekregeling correct te dimensioneren voor de turbine met generator regeling. De voor de stabiliteit kritische frequenties liggen hierbij hoger dan van toepassing is voor het (trage) volgen van de generator karakteristiek.

Bij het ontwerp van de nieuwe transitie regeling is de waarborging van de stabiliteit minder vanzelfsprekend. Het blijkt nodig te zijn de koppelregeling te ontwerpen met in acht name van het digitale karakter van de filtering en PI-regelaar in figuur 8. De PI-regelaar blijkt namelijk zo krachtig te kunnen worden ingesteld (zonder aantasting van de stabiliteit van het systeem waarbij de bemonstering is benaderd met een looptijd), dat de regellus niet langer slechts signalen 'ziet' die relatief traag zijn ten opzichte van de bemonsteringsfrequentie. Derhalve zullen

we de stabiliteit van de koppelregeling in het z -domein analyseren.

Om een indicatie te krijgen tot in welk detail we het systeem bij de stabiliteitsanalyse moeten doorrekenen, zullen we drie modellen met oplopende complexiteit beschouwen. Modellen volgens figuur 8:

1. met een starre drive train (één effectieve massastraagheid) en zonder filtering en koppelservo;
2. zonder filtering en koppelservo;
3. compleet.

Parallel hieraan zullen we bekijken welke standaard door Matlab [6] geboden rekenmethoden bij de stabiliteitsanalyse van nut kunnen zijn. Door te starten met een eenvoudig model dat we ook handmatig zullen doorrekenen, hebben we hiervoor een betrouwbare verificatie.

Bij het eerst te beschouwen model (één effectieve massastraagheid J en geen filtering en koppelservo) ontwerpen we de digitale PI-regelaar ‘tussen de bemonsteringsschakelaars’ op basis van een PI-regelaar die is ontworpen in het continue s -domein. Dit doen we door de continue PI-regelaar met zero order hold op de ingang naar het z -domein te transformeren. We krijgen dan de volgende digitale regelaar:

$$\begin{aligned} Z \left\{ \frac{1 - e^{-sT_{\text{smp}}}}{s} \cdot \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \right\} &= \frac{z - 1}{z} \cdot Z \left\{ \frac{K_p}{s} + \frac{K_i}{s^2} \right\} \\ &= \frac{K_p \cdot z + (K_i \cdot T_{\text{smp}} - K_p)}{z - 1} \end{aligned} \quad (1)$$

Ofwel de digitale PI-regelaar wordt beschreven door:

$$\frac{K_p^* \cdot z + K_i^*}{z - 1} \quad (2)$$

Met:

$$K_p^* = K_p \quad (3)$$

$$K_i^* = K_i \cdot T_{\text{smp}} - K_p \quad (4)$$

Met ingangssignaal x wordt regelaaruitgang y op tijdstip t berekend door:

$$y(t) = y(t - T_{\text{smp}}) + K_p^* \cdot x(t) + K_i^* \cdot x(t - T_{\text{smp}}) \quad (5)$$

Het proces ‘buiten de bemonsteringsschakelaars’ bestaat uit de zero order hold in serie met de effectieve massastraagheid, waarvan de z -getransformeerde (inclusief het minteken van het sommatie-punt wordt gegeven door:

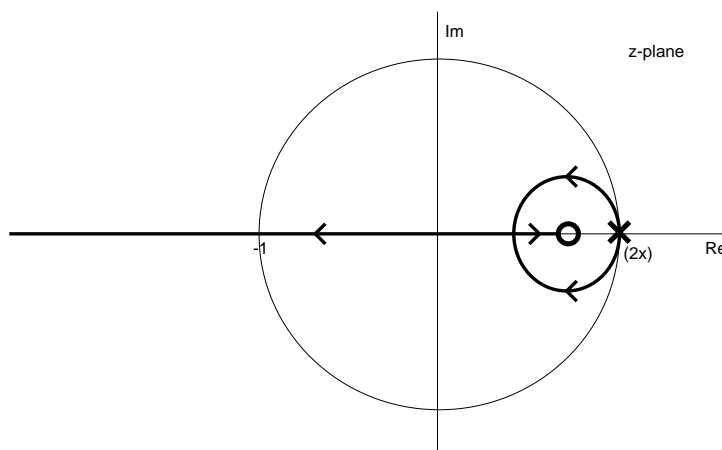
$$Z \left\{ \frac{1 - e^{-sT_{\text{smp}}}}{s} \cdot \frac{-1}{J \cdot s} \right\} = \frac{z - 1}{z} \cdot Z \left\{ \frac{-1}{J \cdot s^2} \right\} = \frac{-1}{J} \cdot \frac{T_{\text{smp}}}{z - 1} \quad (6)$$

Door $K_p = 2 \cdot K_i$ te kiezen, wordt de open lus overdracht:

$$\mathring{H}_1 = \frac{-K_p}{J} \cdot \frac{z - (1 - \frac{T_{\text{smp}}}{2})}{(z - 1)^2} \quad (7)$$

De poolbaan die hierbij hoort is voor relatief grote T_{smp} afgebeeld in figuur 9. De grens tussen stabiel en instabiel ligt op de eenheidscirkel, ofwel bij $z = -1$. Hieruit volgt dat het geregelde model stabiel is zolang:

$$-K_p < \frac{8J}{4 - T_{\text{smp}}} \quad (8)$$



Figuur 9: Poolbaan bij formule 7

Door numerieke waarden in te vullen voor J en T_{smp} , zijn deze resultaten identiek verkrijgbaar door de overdracht 'binnen - en buiten de schakelaars' elk te converteren met het Matlab commando "c2d". Dezelfde poolbaan, inclusief de daaruit af te lezen versterking bij $z = -1$, kan dan met het Matlab commando "rltool" worden getekend.

We vervangen nu de effectieve massastraagheid J door de twee massastraagheden en de flexibele as zoals afgebeeld in het blokschema van figuur 8. Hiermee verkrijgen we het tweede model, met als proces 'buiten de schakelaars':

$$Z \left\{ \frac{\Omega_g}{T_e} \right\} = \frac{-s}{J_g \cdot s^2 + \frac{J_g}{J_p} \cdot k_d \cdot s + \frac{J_g}{J_p} \cdot c_d} \quad (9)$$

Waarin:

$$J_p = \frac{J_r \cdot J_g}{J_r + J_g} \quad (10)$$

Met het "c2d"commando volgt dat het proces is te schrijven als:

$$Z \left\{ \frac{\Omega_g}{T_e} \right\} = -\alpha \cdot \frac{z - \frac{\beta}{\alpha}}{(z - \xi_1)(z - \xi_2)} \quad (11)$$

Met:

$$\xi_{1,2} = \mu \pm j \cdot \nu \quad (12)$$

Bij de tot nu toe in de ECN-regelaars gebruikte bemonsteringsfrequenties (0.1 t/m 0.02 sec) en de exemplarische voorbeeld turbine geldt dat $\alpha \cong \beta$, zodat we voor de open lus overdracht

krijgen:

$$\overset{\circ}{H}_2 = -K_p \cdot \alpha \cdot \frac{z - (1 - \frac{T_{smp}}{2})}{(z - \xi_1)(z - \xi_2)} \quad (13)$$

Bij de exemplarische voorbeeld turbine verhouden de relevante grootheden zich bij benadering tot elkaar volgens:

$$J_g \approx 0.1 \cdot J_r \quad (14)$$

$$c_d \approx J_p \cdot \omega_{dt}^2 \quad (15)$$

$$k_d \approx 2\beta\omega_{dt} \cdot J_p \quad (16)$$

Waarin respectievelijk de drive train eigenfrequentie, de dempingsconstante en de rotormassa-traagheid van de volgende orde grootte zijn:

$$\omega_{dt} \approx 7.5 \text{ rad/s} \quad (17)$$

$$\beta \approx 0.005 \quad (18)$$

$$J_r \approx 10 \cdot 10^7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \quad (19)$$

J_p volgt uit formule 10:

$$J_p = \frac{J_r \cdot J_g}{J_r + J_g} \quad (20)$$

Zowel handmatig als met gebruikmaking van "rtool" is hiermee de poolbaan van figuur 10 te tekenen, met de daaruit volgende beperking voor K_p bij $z = -1$. Voor $T_{smp} = 0.1$ respectievelijk 0.02 seconde volgt als stabiliteits-eis:

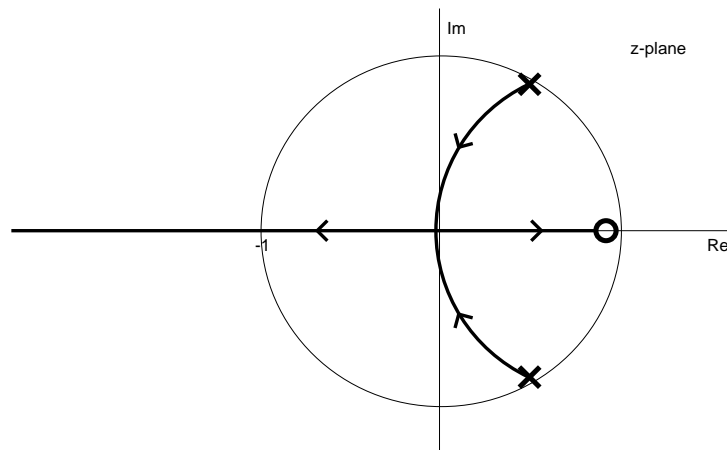
$$-K_p < 1.66 \cdot J_r \left[\frac{\text{Nm}}{\text{rad/s}} \right] \quad (21)$$

$$-K_p < 8.96 \cdot J_r \left[\frac{\text{Nm}}{\text{rad/s}} \right] \quad (22)$$

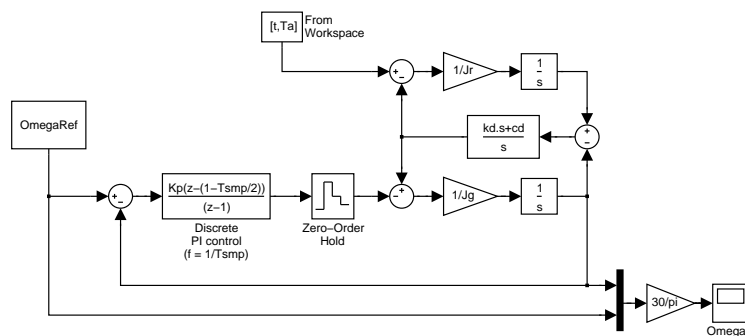
Wanneer we het model met Matlab-Simulink simuleren met een simulatie stapgrootte van 0.001 sec voor het continue proces, blijken dit bruikbare resultaten te zijn. De stabiliteit blijft tot iets grotere waarden nog gewaarborgd. Het Simulink model van figuur 11 wordt voor $T_{smp} = 0.1$ respectievelijk 0.02 seconde instabiel bij:

$$-K_p < 1.84 \cdot J_r \left[\frac{\text{Nm}}{\text{rad/s}} \right] \quad (23)$$

$$-K_p < 9.84 \cdot J_r \left[\frac{\text{Nm}}{\text{rad/s}} \right] \quad (24)$$



Figuur 10: Poolbaan bij formule 13



Figuur 11: Simulink model waarop figuur 10 van toepassing is

Deze waarden komen overeen met de uitkomst van "rltool", wanneer we niet zouden stellen dat $\alpha \cong \beta$ en de poolbaan middels de Matlab commando's "zpkdataën "zpk" met polen en nulpunten zouden voeden.

Voor het derde model, inclusief filtering en koppel servo, blijken de Matlab gereedschappen voor lineaire analyse niet meer snel betrouwbaar te kunnen worden ingezet. Uit de met "rltool" getekende poolbaan zou volgen dat de PI-regelaar bij $T_{smp} = 0.1$ sec. stabiel blijft zolang $-K_p < 2.44 \cdot J_r$. Verificatie met een Simulink model levert echter reeds instabiel gedrag op bij $-K_p = 1.52 \cdot J_r$. Voor $T_{smp} = 0.02$ sec slaagt de standaard programmatuur er niet meer in waarden af te geven. Het Simulink model kent 'internal problems' en de voor het gebruik van "rltool" benodigde polen van het systeem kunnen niet meer met de eerder gebruikte instructies worden berekend.

Desalniettemin hebben we binnen de control tool omgeving de eerste verkennende simulaties met een servo-geregeld generatorkoppel uitgevoerd. Hieruit blijkt de relatief trage bemonstering met $T_{smp} = 0.1$ sec. niet tot bevredigende resultaten te leiden. Bij $T_{smp} = 0.02$ sec. hebben we op empirische wijze echter mooie PI-geregelde transities kunnen realiseren, waarover meer in de volgende paragraaf. Merk hierbij op dat slechts de uitgang van de PI-regelaar met deze snelle bemonsteringstijd werd berekend; de ingang werd gevoed vanuit de filtering met de 'normale' herberekeningstijd van 0.1 sec.

5.2 Simulaties

Deze paragraaf behandelt de simulatie-resultaten van simulaties met de exemplarische voorbeeld turbine, met daarop toegepast de regelaars zoals beschreven in de vorige paragraaf. We zullen eerst de 3 voorgestelde vollastregelingen (constant vermogen, constant koppel en de tussenvorm) met elkaar vergelijken. Met de meest belovende hiervan demonstreren we het profijt van de overlappende modes voor vollast - en deellast bedrijf ten opzichte van de conventionele regeling. Tenslotte vergelijken we nog de 3 voorgestelde transitie regelingen (conventioneel, bij constant toerental en met afnemend toerental bij toenemend vermogen).

De hier beschreven simulaties zijn uitgevoerd in de control tool omgeving. Alle in deze paragraaf afgebeelde plots tonen een kolom van 4 vensters. Deze vensters tonen achtereenvolgens tegen de tijd uitgezet:

- rotortoerental;
- generatorkoppel;
- elektrisch vermogen;
- bladhoek (met meestal daaraan toegevoegd de bladhoeksnelheid).

De eerste drie hiervan zijn genormeerd op hun nominale waarden. De bladhoek is weergegeven middels de werkelijk tijdens de simulatie optredende waarde. Merk op dat de geoptimaliseerde bladhoekstand voor het hele deellast bereik gelijk is gesteld. Deze stand is gecallibreerd op 1° .

vollast

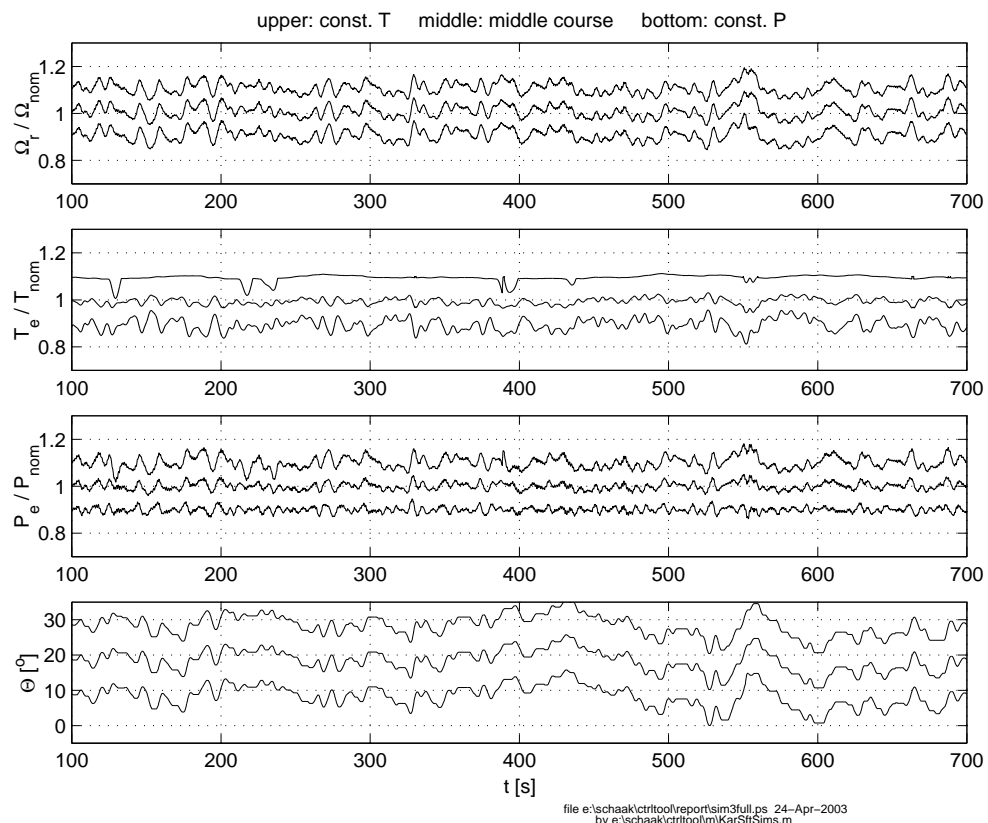
Figuur 12 toont de simulatie resultaten voor de 3 beschouwde vollastregelingen:

- constant koppel;
- tussenvorm;
- constant vermogen.

De hierbij uitgeoefende windsnelheid is 1.6 keer de nominale windsnelheid. Per venster representeert de middelste lijn steeds de tussenvorm. Deze is zonder offset afgedrukt. De constant vermogen - en constant koppel regelingen zijn met een offset van respectievelijk -10% en $+10\%$ (of, in geval van de bladhoek, -10° en $+10^\circ$) afgedrukt. Derhalve wordt de constant vermogen regeling gerepresenteerd door de bovenste - en de constant koppel regeling door de onderste lijnen.

Wat betreft de bladhoek en het toerental leiden de 3 regelingen niet tot relevante verschillen. In het toerental is slechts een licht stabiliserend effect zichtbaar, naarmate de karakteristiek dichter bij de constant koppel curve wordt bedreven. De voorkeur voor de tussenvorm volgt uit het verloop van het vermogen en het koppel:

- Vergeleken met de (meest gebruikelijke) constant vermogensregeling zijn de vermogensfluctuaties nauwelijks groter, terwijl de fluctuaties in het koppel zijn gehalveerd.
- Vergeleken met de constant koppel regeling zijn er weliswaar koppelfluctuaties geïntroduceerd, maar zijn de vermogensfluctuaties ongeveer gehalveerd. Hiermee zijn de vermogens- en koppelfluctuaties van gelijkwaardige grootte.



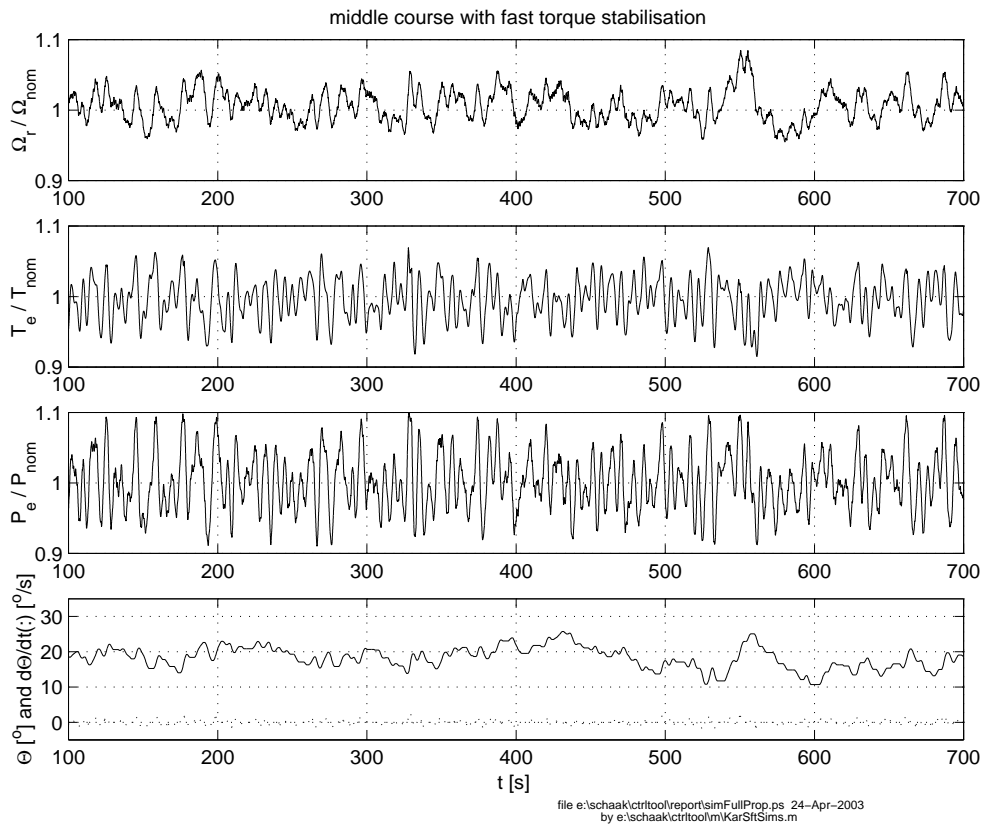
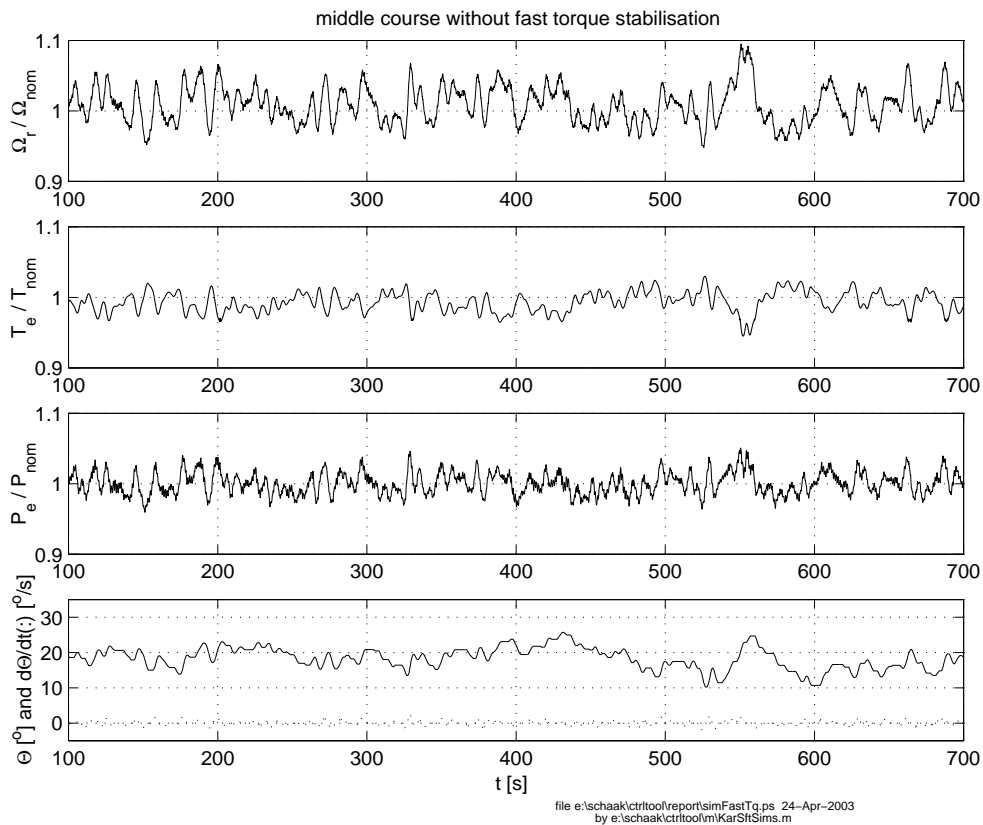
Figuur 12: Vollast regeling conform constant koppel, tussenvorm en constant vermogen

Met name bij de tussenvorm lijkt er voldoende ruimte over te zijn voor aanvullende, relatief snelle, koppelregelingen. Deze kunnen wenselijk zijn om structurele belastingen actief te dempen (zoals drive train trillingen of laterale torenbuiging) of om de bladhoek gestuurde toerenregeling krachtiger te kunnen maken. Dat laatste kan door het koppel aanvullend met een ‘snelle’ differentiërende actie tussen het gemeten toerental en de afgegeven streefwaarde aan te sturen, waardoor het bladhoek geregelde proces stabiel wordt [8].

Deze stabilisatie van de toerenlus is vooral relevant wanneer een conventionele generator karakteristiek wordt toegepast. Dan wordt hiermee het optreden van productie-dips bij boven-nominale windsnelheden namelijk gereduceerd. Als deze dips reeds met één van de hier voorgestelde regelingen zijn geëlimineerd, is de enige winst ervan dat de toerenfluctuaties worden gereduceerd. Het lijkt niet erg waarschijnlijk dat hiervoor bij een variabel toeren turbine vaak zal worden gekozen, aangezien er ook (extra) vermogens- en koppelfluctuaties door worden geïntroduceerd. Een indicatie van de kosten en baten van een dergelijke toevoeging volgt uit de simulatieresultaten van figuur 13. De figuur toont 2 keer een middels de tussenvorm geregelde turbine (zoals ook van toepassing bij figuur 12): in de bovenste plot ‘kaal’ toegepast, daaronder inclusief een stabiliserende koppelregeling en een navenant krachtiger gemaakte bladhoekregeling.

overlappende modes voor vol- en deellast

Nu zullen we beschouwen wat het profijt is van het toepassen van overlappende modes voor vol- en deellast, in vergelijking met een conventionele koppelregeling. Aangezien dit betrekking heeft op het bedrijf bij boven-nominale windsnelheden plus de graduele overgang naar deellast bedrijf bij beneden nominale windsnelheden, beschouwen we hiertoe simulaties met gemiddelde rotor-effectieve windsnelheden van 1.0, 1.2, 1.6 en 2.0 keer de nominale windsnel-



Figuur 13: Vollast conform tussenvorm, zonder (boven) - en met 'snelle' koppelstabilisatie

heid. De hiermee verkregen resultaten zijn respectievelijk afgebeeld in figuur 14 t/m 17.

In de onderste plots van de figuren zien we dat de bladhoek op vergelijkbare wijze wordt bedreven voor de conventionele - en voorgestelde koppelregeling. De relevante verschillen tussen de regelingen blijken uit de optredende toerentallen, generatorkoppels en electrisch vermogens.

In deze serie is figuur 14 een buitenbeentje, aangezien dit de enige simulatie betreft waarbij de windsnelheid een aanmerkelijk deel van de tijd beneden nominaal is. In deze figuur zien we dat de volgende fenomenen optreden, wanneer we de conventionele koppelregeling vervangen door de voorgestelde regeling:

- Tijdens vollast bedrijf fluctueert het koppel iets minder om een iets hogere gemiddelde waarde, fluctueert het toerental iets meer om een iets lagere gemiddelde waarde en blijft het vermogen zich op vergelijkbare wijze manifesteren.
- Zolang de bladhoek niet minimaal is, blijft de productie nominaal.
- Bereikt de bladhoek zijn minimale waarde, dan is de (uitgestelde) overgang naar transitie bedrijf nadrukkelijker merkbaar in het koppel.
- Komend vanuit deellast wordt de nominale productie iets eerder bereikt.

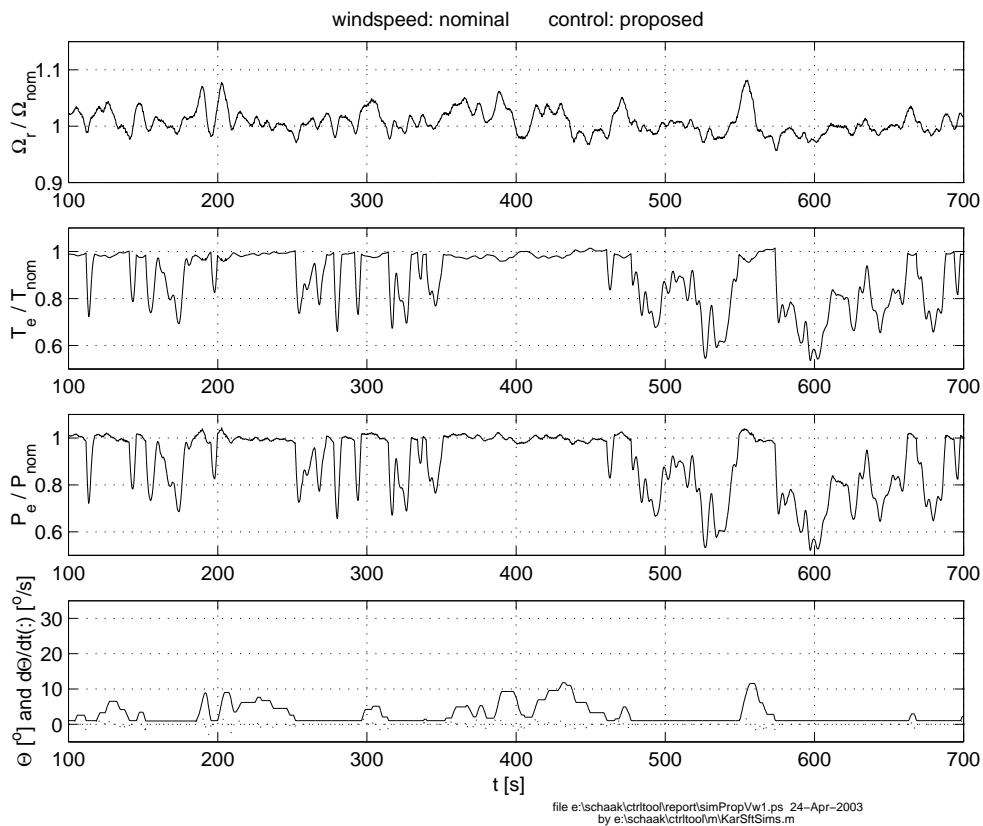
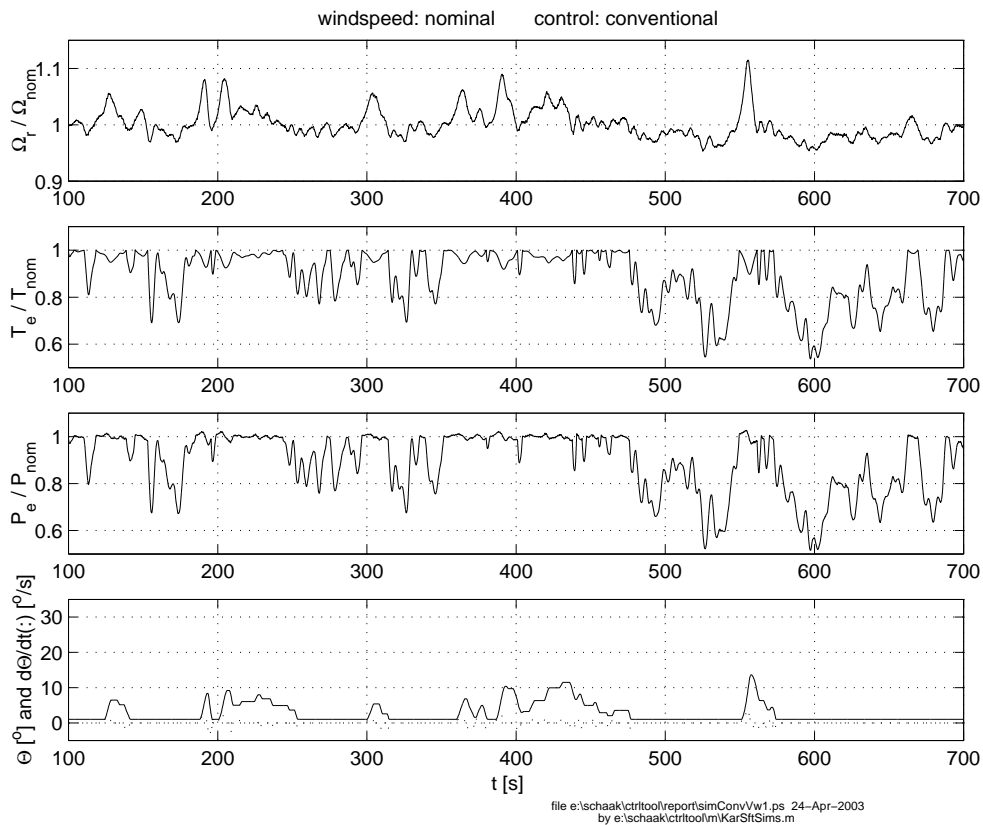
De eerste drie punten zijn toe te dichten aan het continueren van de vollast kromme tot beneden het nominale toerental. Het eerste en tweede punt betreffen het bedrijf bij boven nominale windsnelheden en zullen we nader beschouwen aan de hand van de simulatie resultaten bij de hogere windsnelheden. Het derde punt is een gegeven. Daar valt verder weinig aan toe te voegen.

Het vierde punt is een gevolg van de verschoven transitie, tot aansluiting op de vollast karakteristiek boven het nominale toerental. Doordat de productie tijdens de transitie dan iets dichter bij de optimum Lambda curve ligt, wordt de productie hoger en de nominale waarde eerder bereikt. Gedetailleerde analyse van de simulatie resultaten leert dat de productie tijdens deze simulatie run hierdoor met ongeveer 0.53 % is verhoogd. Voor de gemiddeld nominale windsnelheid is dit de belangrijkste bijdrage aan de productiestijging; door het elimineren van de dips (het derde punt) stijgt de productie slechts met ongeveer 0.16 %.

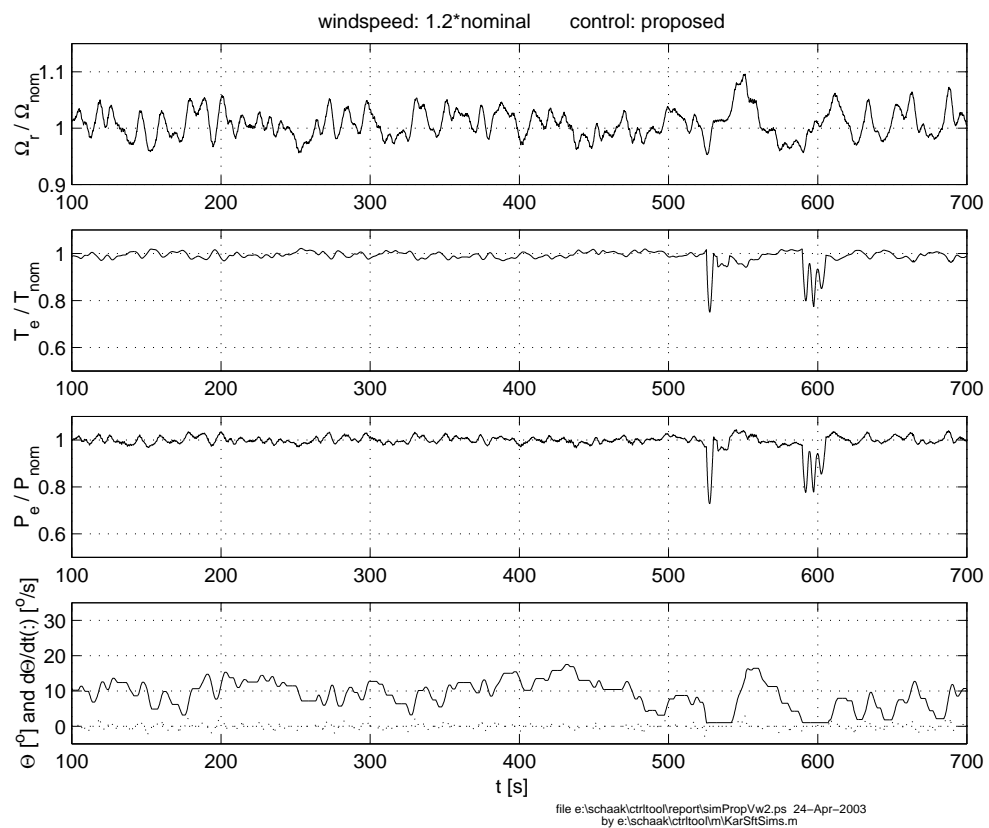
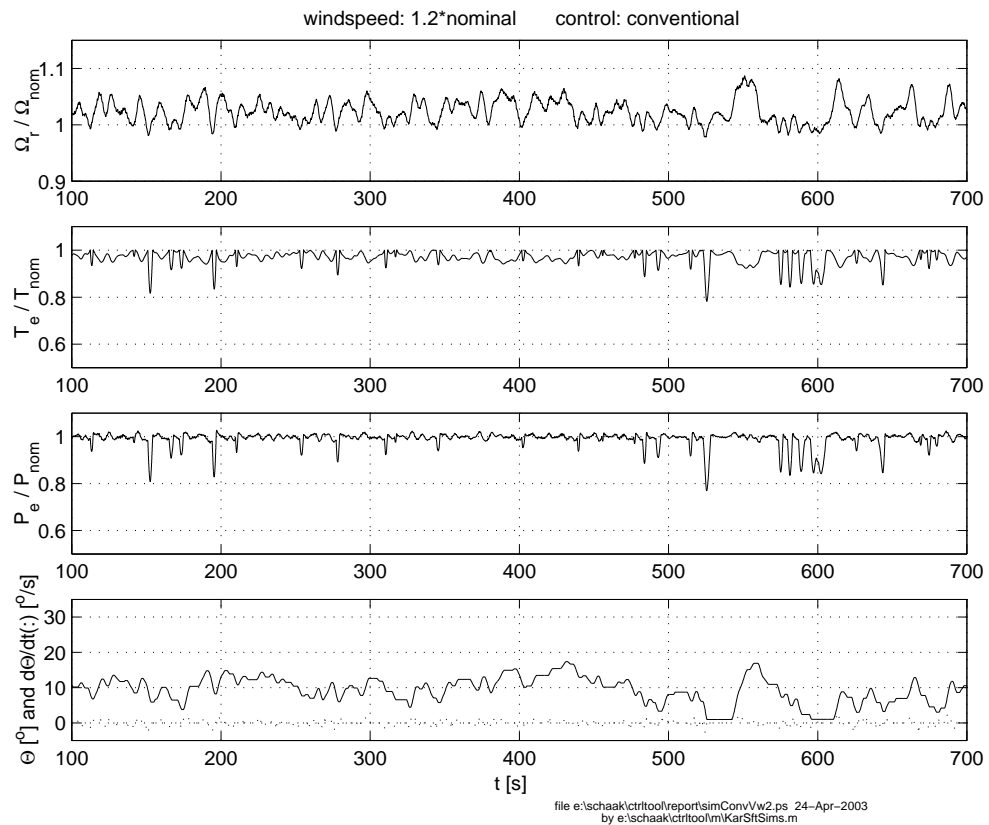
Voor de analyse van de aangepaste generatorregeling bij boven-nominale windsnelheden beschouwen we figuur 15 t/m 17. De resultaten hiervan zijn samengevat in tabel 1. De eerste kolom representeert de op nominaal genormeerde windsnelheid. Kolommen 2 en 3 geven het verschil tussen de gemiddelde - en nominale waarde van respectievelijk het vermogen en het toerental, beiden genormeerd op de nominale waarden. De laatste drie kolommen geven de standaarddeviatie van respectievelijk het vermogen, het toerental en het koppel, alle drie weer genormeerd op de nominale waarden. De 'sub-kolommen' *conv* en *prop* duiden of de resultaten betrekking hebben op de conventionele - danwel voorgestelde (proposed) generatorregeling.

Tabel 1: Simulatie resultaten

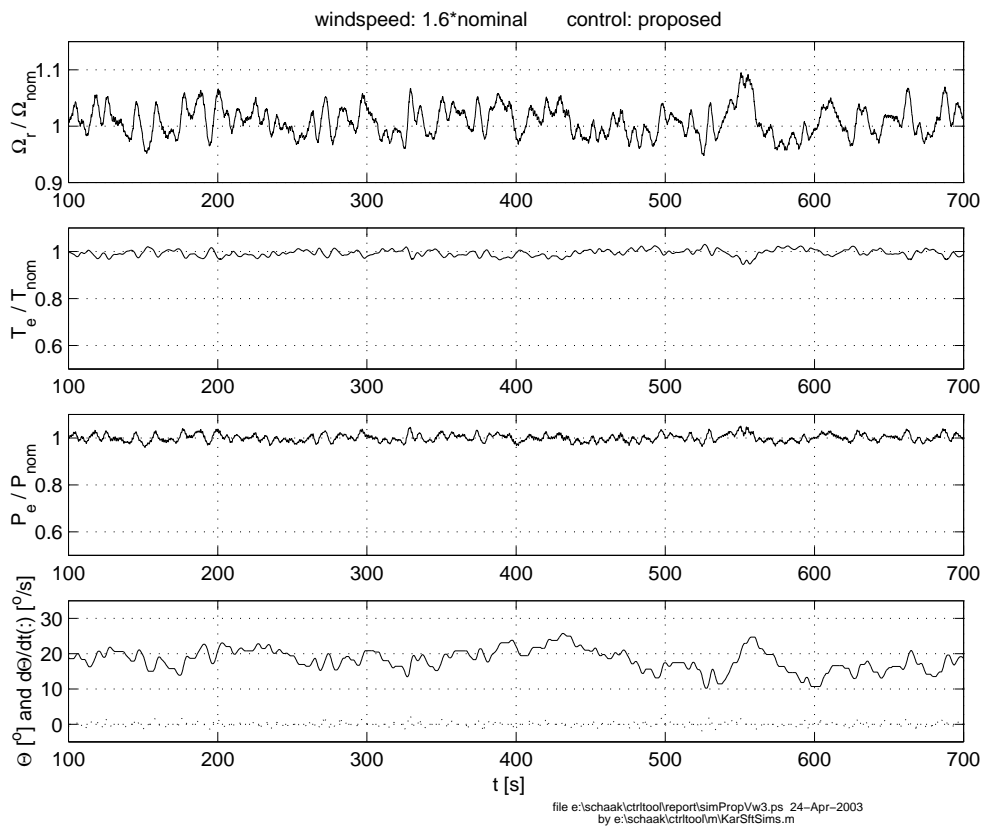
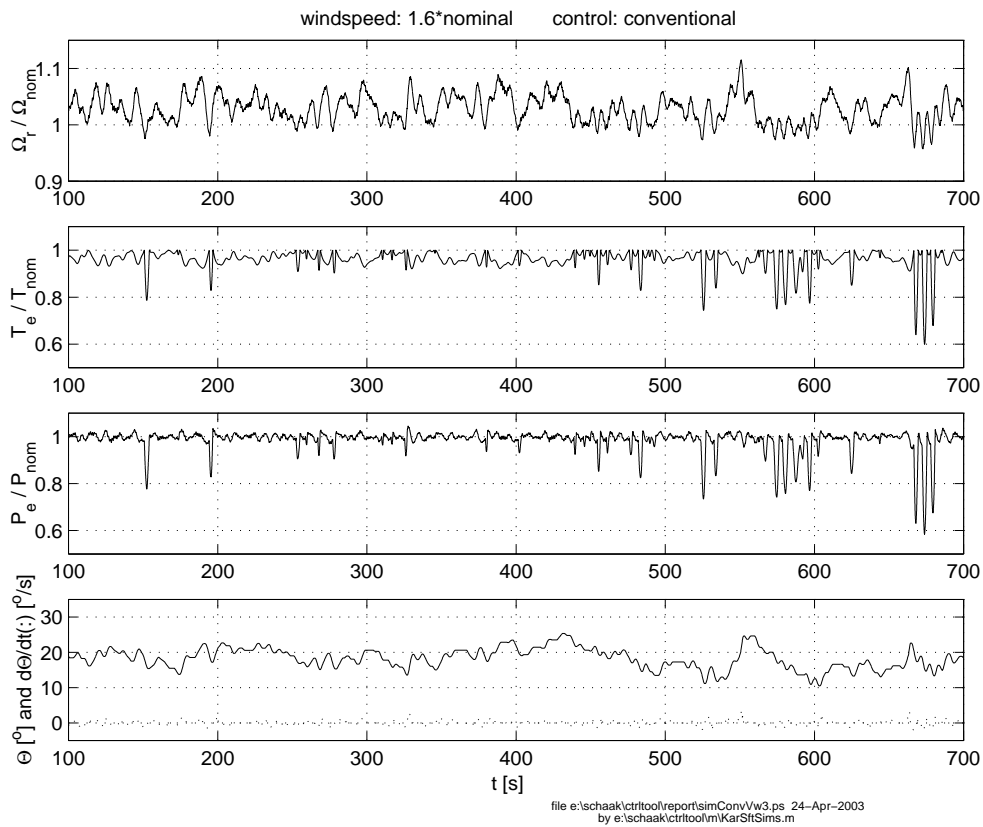
$\frac{V_w}{V_{w,nom}}$	$\frac{P_{mean}-P_{nom}}{0.01 \cdot P_{nom}}$		$\frac{\Omega_{mean}-\Omega_{nom}}{0.01 \cdot \Omega_{nom}}$		$100 \cdot \frac{\sigma(P)}{P_{nom}}$		$100 \cdot \frac{\sigma(\Omega)}{\Omega_{nom}}$		$100 \cdot \frac{\sigma(T)}{T_{nom}}$	
	conv [%]	prop [%]	conv [%]	prop [%]	conv [%]	prop [%]	conv [%]	prop [%]	conv [%]	prop [%]
1.2	-1.05	-0.44	+2.30	+0.76	3.23	3.10	2.05	2.49	2.81	2.83
1.6	-1.53	-0.00	+2.81	+0.84	4.95	1.56	2.52	2.61	4.35	1.44
2.0	-2.33	-0.00	+2.76	+1.03	6.28	1.81	2.80	2.97	5.37	1.64



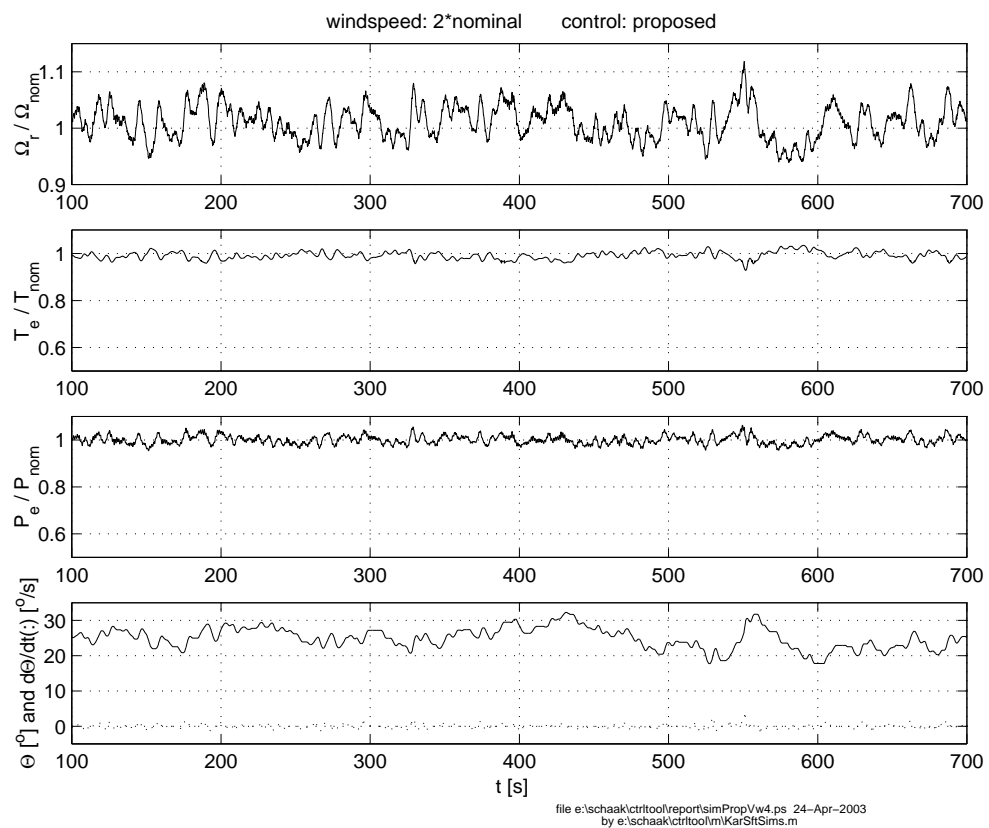
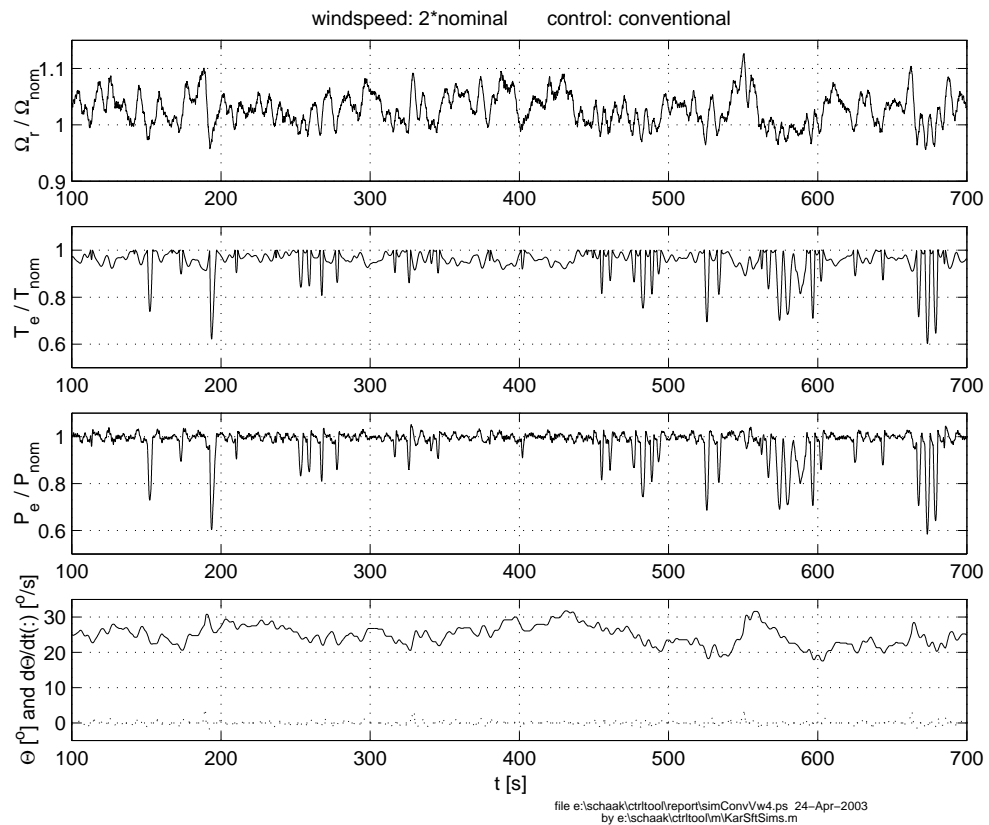
Figuur 14: Regeling: conventioneel (boven) en voorgestelde tussenvorm; windsnelheid: nominaal



Figuur 15: Regeling: conventioneel (boven) en voorgestelde tussenvorm; windsnelheid: 1.2 keer nominaal

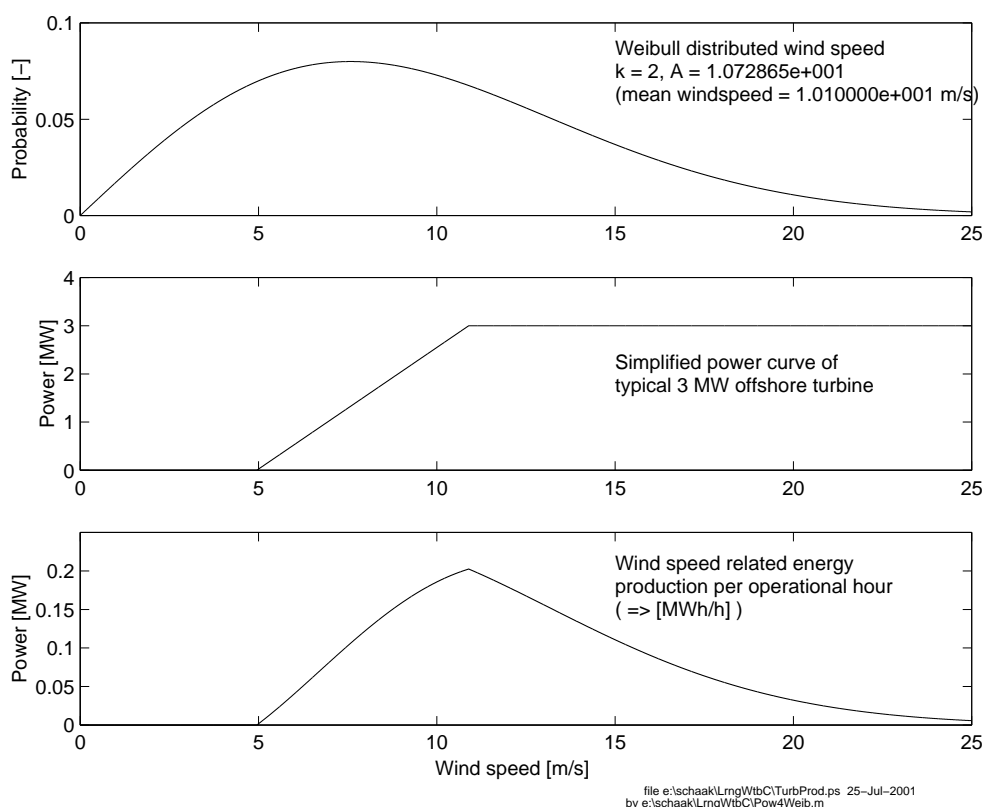


Figuur 16: Regeling: conventioneel (boven) en voorgestelde tussenvorm; windsnelheid: 1.6 keer nominaal



Figuur 17: Regeling: conventioneel (boven) en voorgestelde tussenvorm; windsnelheid: 2 keer nominaal

De meest prominente winst van de voorgestelde generatorregeling is natuurlijk dat de dips in het vermogen en het koppel bij hogere windsnelheden zijn geëlimineerd. Behalve rustiger bedrijf, leidt dit ook tot een stijging van de productie. Met in acht name van het percentage van de tijd dat een turbine een bepaalde windsnelheid ondervindt, kunnen we bij benadering uitrekenen hoeveel de turbine hierdoor uiteindelijk extra gaat produceren. Hiervoor beschouwen we de in de bovenste plot van figuur 18 afgebeelde Weibull verdeling voor de windsnelheid, wat representatief is voor remote offshore Noordzee omstandigheden. Door hieraan een gesimplificeerde vermogenscurve te koppelen, zoals voor een 3 MW turbine in de middelste plot is afgebeeld, verkrijgen we de 'windsnelheid gerelateerde productie per operationeel uur' uit de onderste plot.



Figuur 18: Boven: remote offshore Noordzee Weibull verdeling voor de windsnelheid; midden: gesimplificeerde vermogenscurve voor een 3 MW turbine; onder: bijbehorende windsnelheid gerelateerde productie per operationeel uur

Als we de windsnelheid gerelateerde productie uitrekenen voor de exemplarische voorbeeld turbine (met een iets andere vermogens curve), blijkt dat die turbine globaal de volgende percentages van zijn totale productie per windsnelheidsdebiet produceert:

- optimum Lambda gebied: 4 %
- transitie-gebied: 45 %
- windsnelheid nominaal t/m 1.4 keer nominaal: 36 %
- windsnelheid 1.4 keer nominaal t/m 1.8 keer nominaal: 12 %
- windsnelheid boven 1.8 keer nominaal: 3 %

De voor de dip-eliminatie relevante windsnelheden bevinden zich derhalve in het als derde - en vierde genoemde debiet. De voor deze debieten globaal van kracht zijnde productiestijging door dip-eliminatie volgen uit tabel 1 en zijn respectievelijk $((1 - 0.0044) - (1 - 0.0105)) / (1 - 0.0044) \cdot 100 \approx 0.61\%$ en $((1 - 0.0000) - (1 - 0.0153)) / (1 - 0.0000) \cdot 100 \approx 1.55\%$. Door de eliminatie van de vermogens-dips zal de turbine dus ongeveer $0.36 \cdot 0.61 + 0.12 \cdot 1.55 = 0.40\%$ meer produceren.

Op soortgelijke wijze kunnen we bepalen hoeveel de productie stijgt door het verschuiven van de transitie kromme: 0.45 keer de voor het transitie-gebied van toepassing zijnde productiestijging. Deze stijging blijkt 0.92 % te zijn, bij een simulatie met 0.8 keer de nominale windsnelheid. Derhalve stijgt de productie als gevolg van de verschoven transitie met ongeveer $0.45 \cdot 0.92 = 0.41\%$.

Verificatie met de van toepassing zijnde $C_p(\lambda)$ -curve (vermogenscoëfficiënt als functie van de 'tip to wind speed ratio'), bevestigt dat de middels simulatie gevonden 0.92 % productiestijging van de juiste orde grootte is. In de conventionele situatie vindt de transitie gemiddeld plaats vanaf λ_{opt} t/m $\lambda = \Omega_{nom} \cdot R / V_{w,nom} \approx 0.64 \cdot \lambda_{opt}$, met Ω_{nom} = nominaal toerental, R = rotorstraal, $V_{w,nom}$ = nominale windsnelheid en λ_{opt} = de aërodynamisch optimale λ -waarde, waarop de optimum Lambda kromme is gebaseerd. Aangezien de transitie bij de voorgestelde regeling bij 1.5 % hogere toerentallen ligt, vindt de transitie in dat geval bij benadering plaats vanaf λ_{opt} t/m $\lambda = 1.015 \cdot 0.64 \cdot \lambda_{opt}$. Uit de van toepassing zijnde representatieve $C_p(\lambda)$ -curve blijkt dat dit leidt tot een 0.0 t/m 2.0 % hogere vermogenscoëfficiënt tijdens de transitie. Zonder ons te bekommeren om het precieze karakter van de productie stijging aan het begin en einde van de transitie, stellen we hiermee dat de gevonden gemiddelde productie stijging van 0.92 % tijdens transitie bedrijf realistisch is.

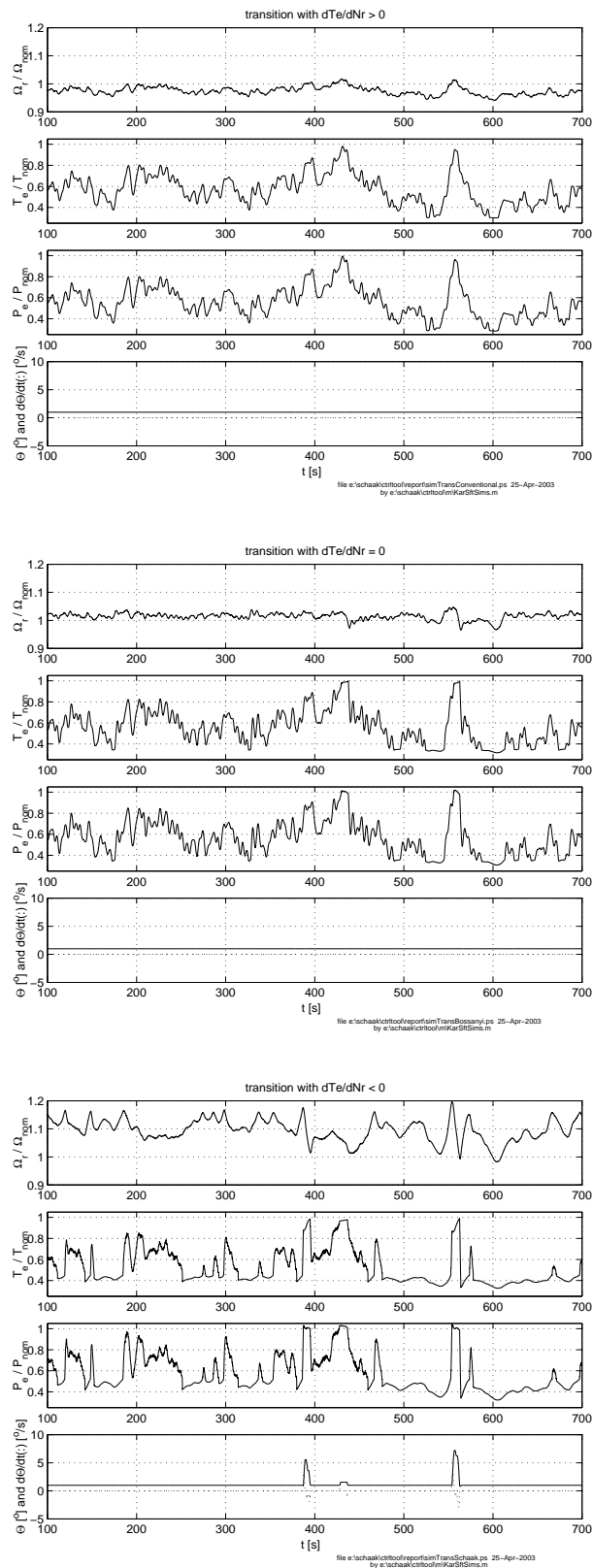
Naast het aanmerkelijk rustiger koppel en vermogen, zien we een iets minder rustig toerental bij de voorgestelde koppelregeling. Wel ligt het gemiddelde toerental 1.5 tot 2.7 % lager. De belangrijkste oorzaak hiervoor is dat er in geval van de conventionele koppelregeling een verhoging van de toerentalstreefwaarde van toepassing is bij hogere bladhoeken (ter beperking van de productie-dips), wat bij de voorgestelde regeling overbodig is geworden en dus achterwege is gelaten. Hiernaast is het gemiddelde toerental enigszins verlaagd, doordat de turbine bij afvallende wind het toerental laat afnemen (volgens de vollast kromme), in plaats van het koppel (volgens de transitie kromme).

transitie

Figuur 19 toont de resultaten van de simulaties met de in paragraaf 5.1 voorgestelde transitieën. De bovenste 4 plots betreffen de conventionele regeling, de middelste 4 de constant toeren regeling en de onderste 4 de regeling met een afnemend toerental bij een toenemend vermogen.

De veronderstelde productie stijging wordt door de simulaties bevestigd. Ten opzichte van de conventionele situatie leidt de constant toeren transitie onder de gesimuleerde omstandigheden tot een productie stijging van 1.63 %. Ten opzichte daar weer van, wordt bij de transitie met een afnemend toerental bij toenemend vermogen nog eens 1.54 % meer geproduceerd (i.e. 3.2 % meer dan conventioneel). Gegeven dat ongeveer 45 % van de totale productie onder de gesimuleerde omstandigheden plaatsvindt, betekent dit dat de turbine door toepassing van de voorgestelde regelingen respectievelijk $0.45 \cdot 1.63 \approx 0.73\%$ en daar bovenop nog eens $0.45 \cdot 1.54 \approx 0.69\%$ meer gaat produceren. De transitie met afnemend toerental bij toenemend vermogen produceert dus 1.4 % meer dan conventioneel. Het is goed mogelijk dat dit percentage nog iets hoger wordt, wanneer deze regeling verder wordt uitgekristalliseerd.

Verder zien we dat wanneer we de conventionele transitie vervangen door de transitie met een constant toerental, dit gepaard gaat met een iets rustiger toerental en een iets minder rustig koppel en vermogen. Wanneer we de vermogensproductie nog verder opschroeven door over



Figuur 19: Transitie-regeling: conventioneel (boven), constant toeren (midden) en met afnemend toerental bij toenemend vermogen; windsnelheid: 0.8 keer nominaal

te gaan op de laatste transitie regeling, zien we dat we weer een deel van de rust in het koppel en vermogen terug krijgen (doordat de turbine langer wordt bedreven op de optimum Lambda kromme). Dit gaat echter ten koste van een nog onrustiger koppel en vermogen als er wel sprake is van transitie, een duidelijk onrustiger toerental en een hoger gemiddeld toerental.

De laatste situatie is de enige waarbij de productie dusdanig hoog is, dat vollast bedrijf wordt bereikt en de bladhoekregeling actief wordt. Merk hierbij op dat aan het terugkeren van vollast - naar transitie bedrijf bij deze eerste indicatieve simulaties geen aandacht is besteed en de generatorregeling dit derhalve niet vloeiend uitvoert.

5.3 Verificatie

De voorkeursuitvoering van de vermogensregeling met overlappende modes, de 'tussenvorm van constant koppel en constant vermogen', is reeds in generieke vorm in ECN's ontwikkelomgeving voor windturbine regelingen geïmplementeerd. Hiermee is voor 2 commerciële windturbines een regeling ontworpen. Beide regelingen zijn succesvol beproefd met verschillende aërodynamische codes, waaronder Phatas.

De transitie-regelingen met koppel-geregelde toeren-servo zijn het niveau van 'garage-versie' nog niet ontstegen. De werking hebben we in de ontwikkelomgeving beproefd, zonder ons te bekommeren over de aansluiting op de optimum-Lambda - en vollastkarakteristiek. Aan deze aansluitingen moet aandacht worden geschonken, voordat het aangepaste transitiebedrijf in de ontwikkelomgeving kan worden opgenomen. Bovendien is de voor deze regeling een toegepaste ontwerpmethodiek nog niet volledig uitgekristalliseerd en zeker nog niet geautomatiseerd.

6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Bij conventioneel bedreven variabel-toeren turbines is het mogelijk gebleken:

1. de productie-dips te elimineren, die voorkomen bij boven-nominaal turbine bedrijf;
2. de transitie van optimum Lambda - naar vollast bedrijf (en vise versa) dichter bij optimum Lambda bedrijf te laten plaatsvinden.

Met gebruikmaking van in de literatuur teruggevonden werkwijzen kan dit de productie reeds met ordegrrootte 0.8 % respectievelijk 0.7 % verhogen. Aan deze werkwijzen hebben we toegevoegd:

- ad. 1: een werkwijze die de hiervoor benodigde toename van het generatorkoppel halveert;
- ad. 2: een werkwijze waarbij de generator tijdens de transitie nog dichter bij optimum Lambda kan worden bedreven (potentiële productieverbodiging ordegrrootte 0.7 %).

De in de literatuur aangetroffen werkwijzen zijn:

- ad. 1: vol- en deellastbedrijf van de generator in gescheiden modes, die elkaar in het toerentalbereik overlappen;
- ad. 2: in het transitie-gebied de turbine bedrijven bij de in vollast gehanteerde streefwaarde voor het toerental.

De hieraan toegevoegde werkwijzen zijn:

- ad. 1: de generator in vollast bedrijven tussen de karakteristieken voor constant vermogen en constant koppel;
- ad. 2: in het transitie-gebied de turbine bedrijven boven de in vollast gehanteerde streefwaarde voor het toerental.

Het aangepast vollastbedrijf in een deellast overlappende mode is reeds in generieke vorm in ECN's ontwikkelomgeving voor windturbine-regelingen opgenomen. Hiermee zijn reeds 2 regelingen voor commerciële windturbines ontworpen, die met verschillende aërodynische codes (waaronder Phatas) zijn beproefd. We stellen voor om ook het uit de literatuur bekende transitiebedrijf bij de in vollast gehanteerde streefwaarde voor het toerental op te nemen in onze ontwikkelomgeving. Transitiebedrijf boven het in vollast gehanteerde toerental is hiervoor nog te onzeker en zal bovendien slechts kunnen worden gebruikt voor offshore turbines.

REFERENTIES

- [1] I. Bossanyi. Electrical aspects of variable wind speed operation of horizontal axis wind turbine generators. Technical Report ETSU W/33/00221/REP, Wind Energy Group Ltd, 1994.
- [2] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi. *Wind Energy - Handbook*. Number ISBN 0-471-48997-2. John Wiley & Sons, England, 2001.
- [3] L.L. Freris. *Wind Energy Conversion Systems*. Number ISBN 0-13-960527-4. Prentice Hall International, United Kingdom, 1990.
- [4] N. Inomata, T. Yamada, and S. Enomoto. Demonstrative operation of wind turbine with a permanent-magnet generator. In *Proc. EWEC 2001*, pages 995–998, 2001.
- [5] C. Lindenburg and J.G. Schepers. Phatas-iv aeroelastic modelling: Program for horizontal axis wind turbine analysis and simulation, version iv. Technical Report (Draft), Energy research Centre of the Netherlands, Petten, The Netherlands, 2001.
- [6] The MathWorks. *MATLAB - The Language of Technical Computing: Using MATLAB Version 5*. The MathWorks Inc., 1996.
- [7] P. Schaak, G.P. Corten, and E.L. van der Hooft. Crossing resonance rotor speeds of wind turbines. In *Proc. EWEC 2003*, 2003.
- [8] E.L. van der Hooft, P. Schaak, and T.G. van Engelen. Wind turbine control algorithms dowec wp 1 - task 3. Technical Report ECN-C-03-111, ECN Wind Energy, Petten, The Netherlands, 2003.

	Date: december 2003	Report No.: ECN-C-03-136	
Title	Koppelregeling van variabel-toeren windturbines		
Author	P. Schaak		
Principal(s)	NOVEM		
ECN project number	7.4153		
Principal's order number	2020-01-12-10-003		
Programmes			
<p>Abstract</p> <p>Bij conventioneel bedreven variabel-toeren turbines is het mogelijk gebleken de generatorregeling zodanig aan te passen, dat:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. de productie-dips, die bij boven-nominaal turbine bedrijf voorkomen, worden geëlimineerd; 2. de turbine tijdens de transitie van deellast - naar vollast bedrijf (en vise versa) meer produceert. <p>Met gebruikmaking van in de literatuur teruggevonden werkwijzen kan dit de productie met ordegrrootte 0.8 % respectievelijk 0.7 % verhogen. Hieraan hebben toegevoegd i) een werkwijze die de voor dip-eliminatie benodigde toename van het generatorkoppel halveert en ii) een werkwijze waarbij de productie tijdens de transitie nog verder kan worden verhoogd (opnieuw ordegrrootte 0.7 %). Deze laatste toevoeging is nog onzeker en zal slechts kunnen worden gebruikt voor offshore turbines.</p> <p>De verbeterde werkwijze voor eliminatie van productie-dips is reeds in generieke vorm in ECN's ontwikkelomgeving voor windturbिनeregelingen opgenomen. Hiermee zijn 2 regelingen voor commerciële windturbines ontworpen, die met verschillende aërodynamische codes (waaronder Phatas) zijn beproefd.</p>			
<p>Keywords</p> <p>deellast, koppelregeling, regeltechniek, variabel toeren, vermogensregeling, vollast, windturbine, windturbिनeregeling</p>			
Authorisation	Name	Signature	Date
Checked	E.L. van der Hooft		
Approved	H.B. Hendriks		
Authorised	H.J.M. Beurskens		