

**Modellering windturbines met Vision**

06-078 pmo

11 mei 2006

© Phase to Phase BV, Arnhem, Nederland. Alle rechten voorbehouden.

Dit document bevat vertrouwelijke informatie. Overdracht van de informatie aan derden zonder schriftelijke toestemming van of namens Phase to Phase BV is verboden. Hetzelfde geldt voor het kopiëren van het document of een gedeelte daarvan.

Phase to Phase BV is niet aansprakelijk voor enige directe, indirecte, bijkomstige of gevolgschade ontstaan door of bij het gebruik van de informatie of gegevens uit dit document, of door de onmogelijkheid die informatie of gegevens te gebruiken.

**INHOUD**

1	Inleiding .....	4
2	Vast toerental windturbine .....	4
3	Variabel toerental windturbine met een converter .....	5
4	Variabel toerental windturbine met een dubbelgevoede inductiegenerator (DFIG) .....	6

1 **INLEIDING**

Een windturbine moet in Vision worden gemodelleerd met een asynchrone of synchrone generator en een of meer condensatoren. Daar komen in veel gevallen nog een transformator, interne kabelsystemen en een beveiliging bij. In het geval dat vermogenselektronica is toegepast wordt ook een (negatieve) belasting gebruikt. Bij het modelleren moet men ermee rekening houden dat het model van de windturbine zowel bij loadflow als bij kortsluitingen de werkelijkheid goed benadert.

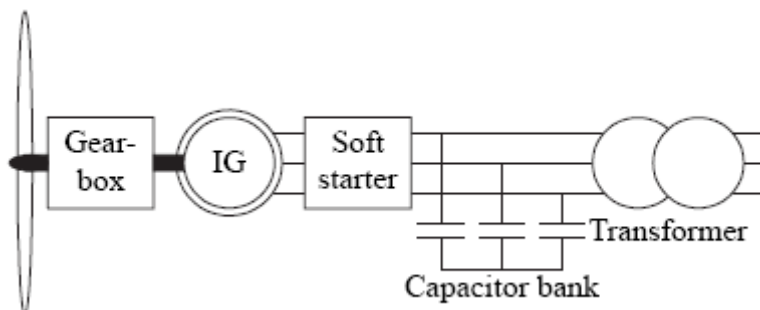
Er bestaan windturbines voor constant en voor variabel toerental. Bij windturbines met vast toerental is de generator (een asynchrone machine) direct gekoppeld aan het net. Aangezien de snelheid met hooguit 1% kan variëren, is elke fluctuatie in de windsnelheid merkbaar in het actieve vermogen. Windturbines met een variabel toerental worden geregeld met behulp van vermogenselektronica, waardoor fluctuaties in windsnelheid voor een groot deel kunnen worden opgeslagen in rotatie-energie van de rotor. Dit laatste zorgt ervoor dat de kwaliteit van de geleverde energie beter is bij windturbines met variabel toerental.

De omwentelsnelheid van de rotor is veel lager dan de elektrische frequentie. Daarom worden vaak een versnellingsbak en meerpolige machines toegepast. Er zijn vier belangrijke soorten windturbinesystemen:

1. vast toerental windturbine met een asynchrone machine
2. variabel toerental windturbine met een asynchrone machine of met een synchrone machine
3. variabel toerental windturbine met een meerpolige synchrone generator of een meerpolige permanent-magneet synchrone generator
4. variabel toerental windturbine met een dubbelgevoede asynchrone machine

2 **VAST TOERENTAL WINDTURBINE**

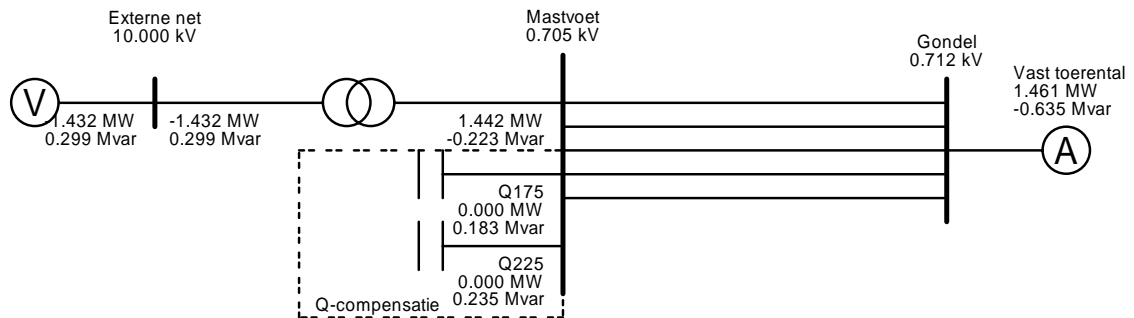
De asynchrone generator in een windturbine met vast toerental is direct gekoppeld aan het net. De rotorsnelheid wordt in principe bepaald door de versnellingsbak en het poolpaartal van de generator. Dit soort windturbines heeft vaak twee vaste toerentallen. Dit systeem is tussen 1980 en 1990 veelvuldig toegepast.



*Vast toerental wind turbine met een asynchrone generator*

De asynchrone machine in deze windturbine levert actief vermogen  $P$  en neemt blindvermogen op. Het actieve vermogen hangt af van de windsnelheid. Het blindvermogen wordt bepaald door de machineparameters. In de windturbine is een condensatorbank opgenomen ter compensatie van het blindvermogen. In veel gevallen worden de condensatoren afhankelijk van het geleverde vermogen

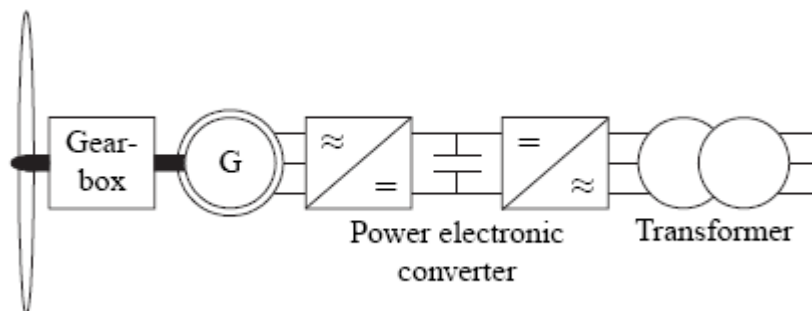
automatisch ingeschakeld. In geval van een kortsluiting levert de windturbine een bijdrage aan  $I_{k,max}$ . Een voorbeeld van de modellering in Vision is hieronder afgebeeld.



Vast toerental wind turbine met een asynchrone generator in Vision

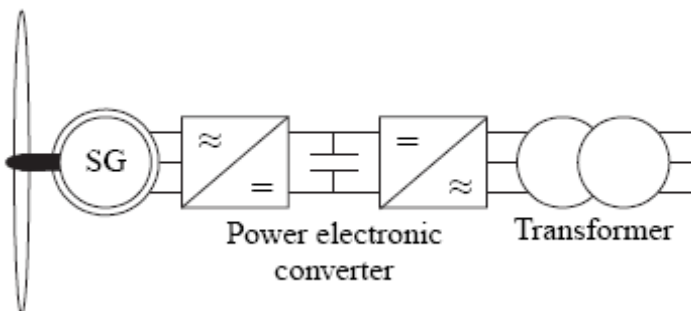
### 3 VARIABEL TOERENTAL WINDTURBINE MET EEN CONVERTER

In het windturbinesysteem in onderstaande afbeelding is de stator van de generator via een converter gekoppeld met het net. De generator kan een asynchrone kortsluitankergenerator zijn of een synchrone generator. De versnellingsbak is zodanig ontworpen dat de maximale rotorsnelheid overeenkomt met het nominale toerental van de generator.



Variabel toerental windturbine met een synchrone/asynchrone generator

In geval van een synchrone generator kan deze met een groter poolpaartal worden uitgerust, zodat een versnellingsbak niet nodig is. Aangezien er veel ervaring is met de toepassing van deze "full-power" converter/generator systemen, is het concept goed uitontwikkeld.

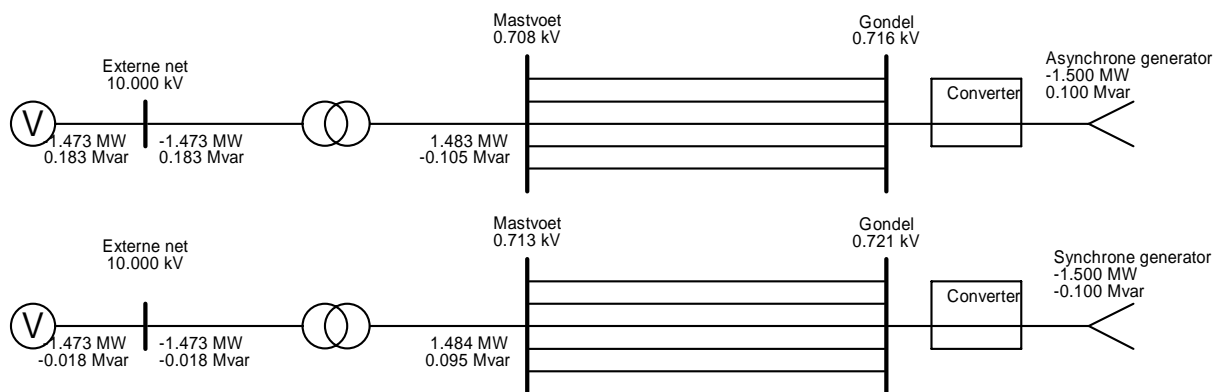


Variabel toerental windturbine met een synchrone generator zonder versnellingsbak

In een windturbinesysteem met variabel toerental is de stator van de generator via een converter gekoppeld met het net. De windturbine levert actief vermogen  $P$ . Indien de generator een asynchrone machine is, neemt deze blindvermogen op. Indien de generator een synchrone machine is, levert deze blindvermogen. De uitwisseling van blindvermogen met het net wordt bepaald door de machineparameters en door de instelling van de converter. Een met thyristoren uitgevoerde converter kan bij een asynchrone generator geen blindvermogen aan het net leveren, een met IGBT's uitgevoerde converter kan dat wel. In geval van een kortsluiting levert deze windturbine geen bijdrage aan  $I_{k,max}$ . Daarom kunnen zowel de asynchrone als de synchrone generator als een negatieve belasting worden gemodelleerd. Het blindvermogen van de totale windturbine hangt van de combinatie generator/converter af.

Generator	Converter	Blindvermogen windturbine
Asynchroon	Thyristor	Opnemen
Asynchroon	IGBT	Opnemen / Leveren
Synchroon	Thyristor	Leveren
Synchroon	IGBT	Leveren

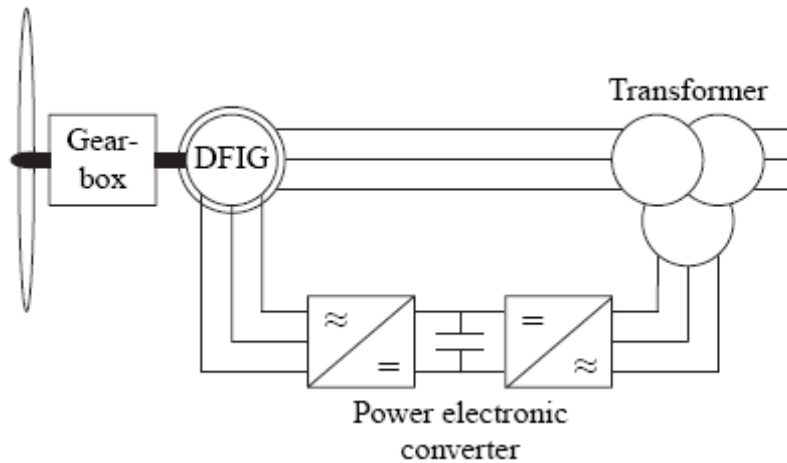
Een voorbeeld van de modellering van beide varianten in Vision is hieronder afgebeeld.



Variabel toerental windturbine met een synchrone/asynchrone generator in Vision

#### 4 VARIABEL TOERENTAL WINDTURBINE MET EEN DUBBELGEVOEDE INDUCTIEGENERATOR (DFIG)

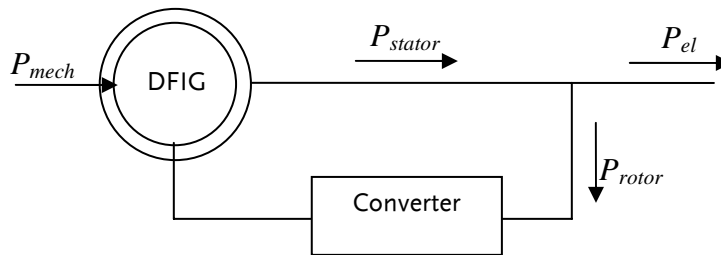
Het windturbinesysteem van onderstaande afbeelding is voorzien van een dubbelgevoede inductiegenerator. Dit betekent dat de stator direct gekoppeld is met het net en dat de rotorwikkling via sleepringen is verbonden met een converter. Met name doordat de vermogenselektronische omzetter maar ongeveer een kwart van het totale vermogen hoeft te voeden, is dit concept erg populair geworden voor variabel toerental windturbines. De verliezen in de converter zijn veel minder dan bij een systeem met een "full-power" converter. Bovendien is de converter goedkoper. Het is mogelijk de rotorwikkling op een externe weerstand aan te sluiten.



Variabel toerental windturbine met een dubbelgevoede inductiegenerator

De omzetter is een "back-to-back" converter en bestaat uit twee converters met een dc-link ertussen. De converter die is aangesloten op de rotorwikkelingen regelt het koppel, het toerental en de arbeidsfactor aan de statorklemmen.

Tijdens normaal bedrijf gedraagt de windturbine zich als een synchrone machine. Door regeling van de frequentie van de stroom door de rotorwikkeling kan de generator bij elke gewenst rotortoerental toch synchroon draaien. De rotorwikkeling wordt met een zodanige wisselstroom gevoed, dat het elektromagnetisch veld in de luchtspleet het verschil tussen het rotor- en statorveld compenseert.



Vermogensbalans windturbine met DFIG

Het elektrische vermogen van de windturbine is gelijk aan het verschil van het statorvermogen en het rotorvermogen. Onderstaande vergelijkingen beschrijven de relaties tussen de mechanische en elektrische vermogens:

$$P_{el} = \eta \cdot P_{mech}$$

$$P_{el} = P_{stator} - P_{rotor}$$

$$P_{stator} = P_{el} / (1 - s)$$

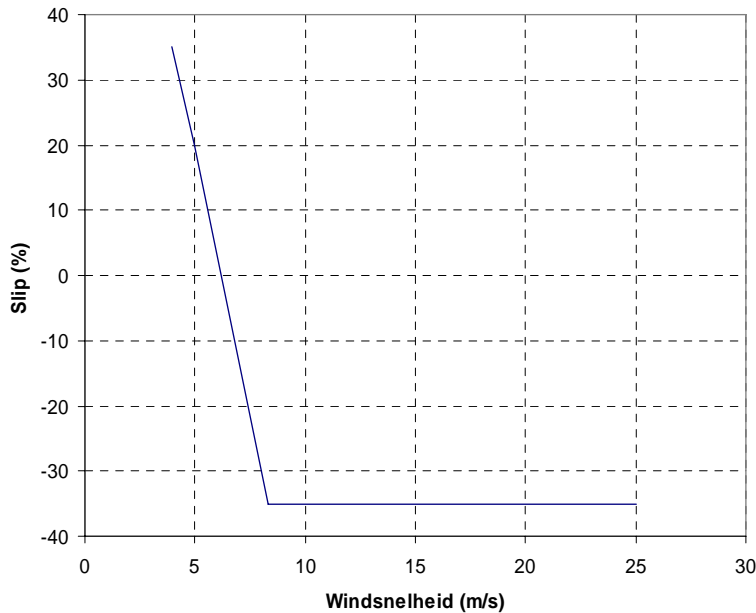
$$P_{rotor} = sP_{stator} = sP_{el} / (1 - s)$$

Hierin is  $s$  de slip. Bij een door voldoende wind aangedreven windturbine draait de generator "boven-synchroon" en is de slip negatief. Bijvoorbeeld bij een slip van -30 % is de rotorsnelheid 1,3 pu. Het statorvermogen is dan 0,77 maal  $P_{el}$  en het rotorvermogen is dan -0,23 maal  $P_{el}$ . Dat betekent dus dat bij vol vermogen ongeveer een kwart van het windturbinevermogen uit het rotorcircuit komt. In nullast is het rotorvermogen nul.

Bij een windturbine kan de slip zowel positief als negatief zijn. Een positieve slip treedt op indien de generator "sub-synchroon" draait. In het algemeen is bij een windturbine de slip positief bij een laag

mechanisch vermogen en negatief voor een hoog mechanisch vermogen. Onderstaande afbeelding geeft de slip weer als functie van de windsnelheid.

Slip als functie van windsnelheid

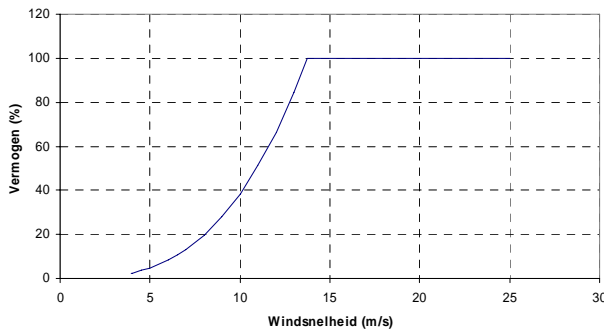


Het mechanische vermogen van de windturbine is afhankelijk van de windsnelheid, de luchtdichtheid, de rotorbladdiameter en een vermogenscoëfficiënt.

$$P_{mech} = 1/2 \rho \cdot \pi R_{blad}^2 \cdot V_{lucht}^3 \cdot C_p$$

Het vermogen is begrensd ter voorkoming van beschadiging van de windmolen. Onderstaande afbeelding geeft het verband tussen windsnelheid en vermogen.

Vermogen als functie van windsnelheid

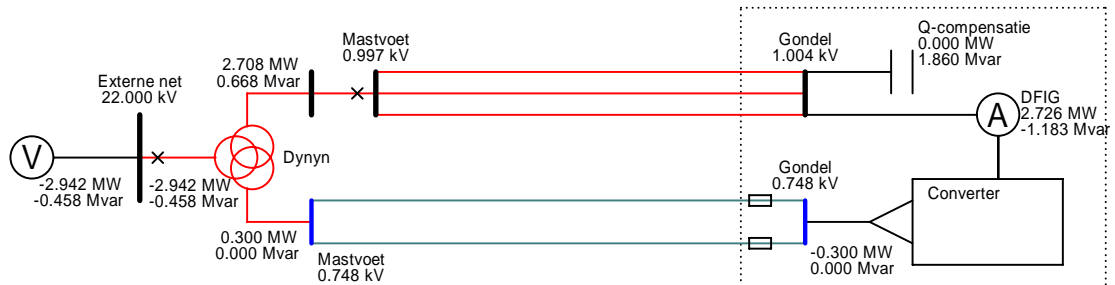


In geval van een kortsluiting in het net draagt de windturbine bij aan deze kortsluiting en is de statorstroom groot. Als gevolg zal ook de rotorstroom groot worden. Ter bescherming van de vermogens-elektronica in de converter wordt onmiddellijk het rotorcircuit kortgesloten. Als gevolg gedraagt de generator zich tijdens kortsluiting als een asynchrone machine.

Voor een correcte modellering in Vision kan de generator voor loadflowberekeningen als een synchrone generator worden gemodelleerd en voor kortsluitberekeningen als een asynchrone generator. Aangezien dit niet praktisch is, wordt voorgesteld om de generator te modelleren met een asynchrone generator en een vaste condensator (Bozelie, 2003). In onderstaand voorbeeld is de condensator



opgenomen in de gondel. De converter is gemodelleerd als een negatieve belasting met een constant vermogen van -0,3 MW en 0 Mvar. In gevallen van deellast moet het convertervermogen evenredig met het generatorvermogen worden verminderd. Bij loadflowberekeningen zal de windturbine actief en blindvermogen leveren. In een kortsluitberekening zal de windturbine zich gedragen als een asynchrone machine. De condensator en de converter leveren dan geen bijdrage aan de kortsluitstroom.



*Variabel toerental windturbine met een dubbelgevoede inductiegenerator in Vision*

**REFERENTIE**

Bozelie, 2003: "Windparken ontwerpen met Vision", Jan Bozelie, Vision gebruikersdag, Arnhem, december 2003