

PROCESSIMULATOR VOOR WINDTURBINEBESTURINGEN

Volume II: Systeemanalyses

E.L. van der Hooft
T.W. Verbruggen
T.G. van Engelen

Verantwoording

Dit project is uitgevoerd in opdracht van Novem onder de TWIN-2 regeling (Novem projectnummer 224.721-0017, ECN projectnummer 7.4097).

Erkentelijkheid gaat uit naar Lagerwey the Windmaster en NEWINCO voor het beschikbaar stellen van vertrouwelijke turbinespecificaties.

Verder worden Luc Rademakers bedankt voor projectcoördinatie en Pieter Schaak voor algemene bijdragen tijdens de uitvoering van dit project.

Abstract

Door opschaling en minder toegankelijke offshore locaties is vooraf testen van besturings-systemen van windturbines steeds belangrijker om te kunnen voldoen aan hoge betrouwbaarheidseisen. Met processimulaties kan beoordeeld worden of het besturingssysteem het falen van componenten en (deel)systemen naar behoren afhandelt en of extreme bedrijfstoestanden goed worden doorstaan.

Het project, met als einddoel het real-time processimulatie-gereedschap voor windturbine besturingssystemen, WINDCONTEST, bestaat uit twee fasen. De werkzaamheden in fase I betreffen probleemanalyse en systeemanalyse, in de voorziene fase II zijn dit modellering en implementatie.

Systeemanalyses zijn uitgevoerd voor windturbines met constant toerental en variabel toerental. De analyses geven invullingen aan de inventarisatie- en definitietaak. In het rapport 'systeemanalyses' worden de definitie resultaten beschreven volgens de werkwijze zoals bepaald in het eerste rapport (probleemanalyse). De inventarisatieresultaten bevatten veelal specifieke windturbine gegevens en zijn daarom opgenomen in vertrouwelijke annexen, die apart zijn uitgebracht.

Op basis van de analyseresultaten kunnen in de voorziene fase II van dit project, doelmatig procesmodellen en programmatuur afgeleid worden voor de realisatie van het processimulatie-gereedschap. De werkzaamheden voor fase I zijn daarmee voltooid.

INHOUD

1.	INLEIDING	7
2.	ANALYSE METHODIEK	9
3.	SYSTEEMANALYSE LW50-750/B2A	11
3.1	Algemene beschrijving	11
3.1.1	Concept en specificaties	11
3.1.2	Besturingssysteem	12
3.2	Systeemanalyse	13
3.2.1	Bladensysteem	14
3.2.2	Meteosysteem	17
3.2.3	Bladverstelsysteem	18
3.2.4	Hoofdlager-systeem	20
3.2.5	Generatorbewaking-systeem	21
3.2.6	Elektrisch conversiesysteem	22
3.2.7	Transmissiesysteem	24
3.2.8	Toren- en fundatie-systeem	25
3.2.9	Krui- en retwistsysteem	27
3.2.10	Beveiligingssysteem	29
3.2.11	Voedingssysteem	31
4.	SYSTEEMANALYSE NW62/3/1000	33
4.1	Algemene beschrijving	33
4.1.1	Concept en specificaties	33
4.1.2	Besturingssysteem structuur	33
4.1.3	Besturings- en beveiligingsstrategie	34
4.2	Systeemanalyse	35
4.2.1	Bladensysteem	36
4.2.2	Meteosysteem	39
4.2.3	Bladverstelsysteem	40
4.2.4	Remsysteem	44
4.2.5	Elektrisch conversiesysteem	46
4.2.6	Transmissiesysteem	49
4.2.7	Toren- en fundatiesysteem	52
4.2.8	Krui- en retwistsysteem	54
4.2.9	Bedienings- en beveiligingsysteem	57
4.2.10	Voedingssysteem	59
5.	MEDIA-ANALYSE	61
5.1	Wind	61
5.1.1	Windsnelheid	61
5.1.2	Windrichting	65
5.2	Golven	66
5.3	Grond	70
5.4	Elektriciteitsnet	71
6.	CONCLUSIE	73
7.	REFERENTIES	75
BIJLAGE A	SYSTEEM-ANALYSE SJABLOON	77
BIJLAGE B	MEDIA-ANALYSE SJABLOON	79

SAMENVATTING

Voor twee conceptueel verschillende turbines, te weten de LW50-750/B2a (Lagerwey the Windmaster) en de NW62/3/1000 turbine (NEWINCO) is een systeemanalyse gemaakt ter voorbereiding op de modellering en implementatie taken zoals deze in projectfase II worden voorzien (Tabel 1).

Tabel 1: conceptuele verschillen voor LW50-750/B2a en NW62/3/1000 turbine.

	LW50-750/B2a	NW62/3/1000
transmissie	direct drive	tandwielkast
conversie	back to back converter (IGBT's)	softstarter met bypass (thyristoren)
generator	synchrone multipool generator	asynchrone twee toeren generator
bladverstelling	elektrische onafhankelijke bladverstelling naar vaanstand	hydraulische mechanisch gekoppelde bladverstelling naar overtrek

De analyse is uitgevoerd volgens de werkwijze zoals voorgesteld in de eerste taak binnen dit project (Volume I: Probleemanalyse, [A2]). Door het opstellen van een *systeem sjabloon* voor windturbine (systeem)analyse en een *sjabloon voor media analyse* (wind, golven e.d.), is op gestructureerde wijze tegelijkertijd invulling gegeven aan de inventarisatietask (systeem-uitvoering en -werking) en de definitietask (analyse t.b.v. modellering) van het werkplan.

Voor processimulatie kunnen op basis van de systeemanalyse van beide turbines de volgende systemen worden onderscheiden die als uitgangspunt zullen dienen voor modellering in de volgende projectfase II (Tabel 2):

Tabel 2: generalisatie van systemen en processen voor processimulatie

Windturbinedeel	Systeem	Processen voor processimulatie
Rotor	Bladensysteem	aërodynamische conversie en voorzieningen aan de rotorbladen
	Meteosysteem	metingen van meteorologische grootheden
	Bladverstelsysteem	bladhoekverstelling door aandrijving van de bladen, bladlager/wortel
Aandrijftrein	Transmissiesysteem	mechanisch conversie, en conditionering met betrekking tot hoofdlager/-as, tandwielkast, rem
	Elektrisch conversiesysteem	elektrische conversie door generator en converter, netkoppeling door transformator en netschakelaar
Ondersteuning	Toren- en fundatiesysteem	torentrillingen en buigvormen als gevolg van excitaties
	Krui- en retwistsysteem	gondelrotatie door actieve aandrijving, twisten van de generatorkabel
Algemeen	Beveiligingssysteem	noodvoorziening(en) voor conditioneel tot stilstand brengen van windturbine
	Voedingssysteem	conditionele voedingsvoorwaarden voor systeem en component activering.

Tot alle onderscheiden systemen behoren ook de aanwezige *metingen* en *detecties* voor bewaking en beveiliging van de processen en componenten in dat systeem. Uitgebreidere systeembeschouwingen worden voor beide turbines in de hoofdstukken 3 en 4 beschreven. Hierin zijn voor ieder systeem puntsgewijs de componenten, in/externe systeeminteracties en constant/continu/discreet systeemgedrag belicht op basis van een daaraan voorafgaande systeeminventarisaties.

Omdat de inventarisatieresultaten veelal windturbine specifiek gegevens bevat, zijn deze uitgebracht als vertrouwelijke annexen voor de LW50-750/B2a turbine [A4] en NW62/3/1000 turbine [A5].

Binnen de processimulator worden tevens faciliteiten voorzien om fysieke systemen en componenten hardwarematig op te nemen in plaats van te simuleren ('hardware in the loop'). Hiervoor blijken met name bladverstelsysteem, krui- en retwistsysteem en beveiligingssysteem in aanmerking te komen.

Vanuit de systeemanalyses zijn voor processimulatie benodigde media onderscheiden. Ieder medium is uit oogpunt van modellering (projectfase II) geanalyseerd (Tabel 3).

Tabel 3: generalisatie van media

Medium	Processen voor processimulatie
Wind (stochastisch)	rotoreffectieve windsnelheid bladeffectieve windsnelheid windsnelheid in een vast punt windrichting in een vast punt
Golven	krachteffectieve golfversnelling
Grond	passief reactiemedium
Elektriciteitsnet	elektrisch interactief gedrag

Uitgebreidere mediabeschouwingen zijn in hoofdstuk 5 beschreven. Ook zijn hierin voor ieder medium puntsgewijs het constant/continu/discreet systeemgedrag en de interactie met systemen belicht.

1. INLEIDING

Windturbinefabrikanten onderkennen steeds meer het belang van een goede processimulator voor het veilig en betrouwbaar testen van turbinebesturingssystemen¹. Met name in het geval dat windturbines geplaatst gaan worden op moeilijk bereikbare locaties zoals offshore. Cruciaal hierbij is dat een simulator juist de storings- en uitzonderingstoestanden in componenten, systemen en omgevingscondities moet kunnen omvatten, en met name ook de samenhang in de tijd tussen verschillende van deze toestanden.

Om deze redenen is bij ECN het processimulatie-gereedschap WINDCONTEST² in ontwikkeling, waarmee een specifieke turbine-outline snel kan worden vertaald naar een operationele real-time processimulator, met inbegrip van mogelijke fout en uitzonderingscondities. Het in het gesimuleerde proces opnemen van fysieke ‘hardware in the loop’ apparatuur zal hierbij tot de mogelijkheden behoren.

Projectfase I is afgerond door het uitvoeren van systeemanalyses voor twee verschillende windturbines en vormt het uitgangspunt voor de op modellering en implementatie gerichte projectfase II. De systeemanalyses zijn uitgevoerd voor twee bestaande maar conceptueel verschillende windturbines: LW50-750/B2a van Lagerwey the Windmaster (variabel toerental, elektrische bladverstelling naar vaanstand) en de NW62/3/1000 van NEWINCO (constant toerental, hydraulische bladverstelling naar overtrek).

De analyse methodiek geeft op gestructureerde wijze gestalte aan de inventarisatie en definitie taken zoals deze reeds eerder tijdens de probleemanalyse in fase I zijn voorgesteld. In hoofdstuk 2 wordt de gevolgde analyse methodiek gedetailleerd besproken.

De resultaten van de systeemdefinitie, voor de onderkende systemen voor processimulatie van de LW50-750/B2a, zijn opgenomen in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 is hetzelfde voor de NW62/3/1000 turbine gedaan. Omdat de inventarisatieresultaten veelal windturbine specifiek gegevens bevat, zijn deze uitgebracht als vertrouwelijke annexen voor de LW50-750/B2a [A4] en NW62/3/1000 turbine [A5].

Van de op beide windturbines van invloed zijnde media (wind, golven e.d.) is een gelijksoortige analyse verricht naar aspecten die voor processimulatie belangrijk zijn. De resultaten hiervan zijn opgenomen in hoofdstuk 5.

Tot slot word in het laatste hoofdstuk teruggeblikt in hoeverre de resultaten van projectfase I voldoende perspectieven bieden voor uitvoering van fase II.

¹ Voor veel voorkomende termen is binnen dit project een definitie van toepassing, deze zijn in Volume 1:Probleemanalyse [A2], gedefinieerd.

² **Wind** turbine **C**ontrol Systems **T**est, **E**valuation and **S**imulation **T**ool

2. ANALYSE METHODIEK

Zoals in de probleemanalyse [A2] voorgesteld wordt er voor processimulatie onderscheidt gemaakt tussen de items *windturbine* en *media*. De beide items worden geanalyseerd om tot meer inzicht te komen welke aspecten er voor processimulatie van belang zijn.

De (systeem)analyse van de windturbine richt zich op twee bestaande maar conceptueel verschillende windturbines: LW50-750/B2a (Lagerwey the Windmaster) en NW62/3/1000 (NEWINCO). De combinatie van enerzijds het direct drive / active pitch to vane (electrisch) / variabel toerental concept van de LW50-750/B2a, en anderzijds het gearbox / active pitch to stall (hydraulisch) / constant speed concept van de NW62/3/1000, geeft een prima diversiteit aan componenten en besturingsstrategieën. Dit is gunstig voor een breed toepassingsgebied voor de processimulator (genericiteit).

Systeemanalyse

Het analyseren van de twee turbines is systematisch opgezet aan de hand van een *systeem-sjabloon*. Met het *systeem-sjabloon* wordt per turbine voor ieder, arbitrair maar wel logisch gekozen, systeem een specificatie opgesteld die de relevante aspecten van het besturingssysteem voor de toekomstige modelleringstaak in projectfase II beschrijft. Het sjabloon bestaat uit een *inventariserend gedeelte* en een *definiërend gedeelte* [A2].

Het inventariserend gedeelte richt zich op de uitvoering en werking van het systeem:

- *opbouw en werking*: fysieke uitvoering en werkwijze van het systeem;
- *metingen*: sensoren en detecties ten behoeve van dit systeem;
- *beveiligingen*: beveiligingsaspecten binnen dit systeem;
- *systeem I/O*: gedrag van/naar het besturingssysteem.

Het definiërend gedeelte richt zich op de aspecten die voor modellering van de processimulator van belang zijn:

- deelsystemen en componenten voor modellering;
- interne systeeminteracties tussen deelsystemen en componenten;
- externe systeeminteracties met andere systemen en media;
- samenstelling ofwel constante eigenschappen;
- fenomenen ofwel te onderscheiden continu gedrag;
- events ofwel te onderscheiden discreet gedrag;
- mogelijkheden voor 'hardware in the loop'.

Het systeem-sjabloon is opgenomen in bijlage A. Met name de inventarisatie gegevens zijn grotendeels gebaseerd op vertrouwelijke fabrikantdocumenten van de windturbine en het besturingssysteem. De definitieresultaten zijn daarom in dit rapport terug te vinden in hoofdstuk 3 voor de LW50-750/B2a en in hoofdstuk 4 voor de NW62/3/1000 turbine. De aanvullende inventarisatiegegevens zijn opgenomen in vertrouwelijke annexen [A4][A5]. Fabrikantseigendommen zoals instellingen, besturingsstrategische gegevens, elektrotechnische- en werktuigbouwkundige schema's en softwarecodes zijn opgenomen in het projectdossier dat slechts voor geautoriseerden beschikbaar is.

Media-analyse

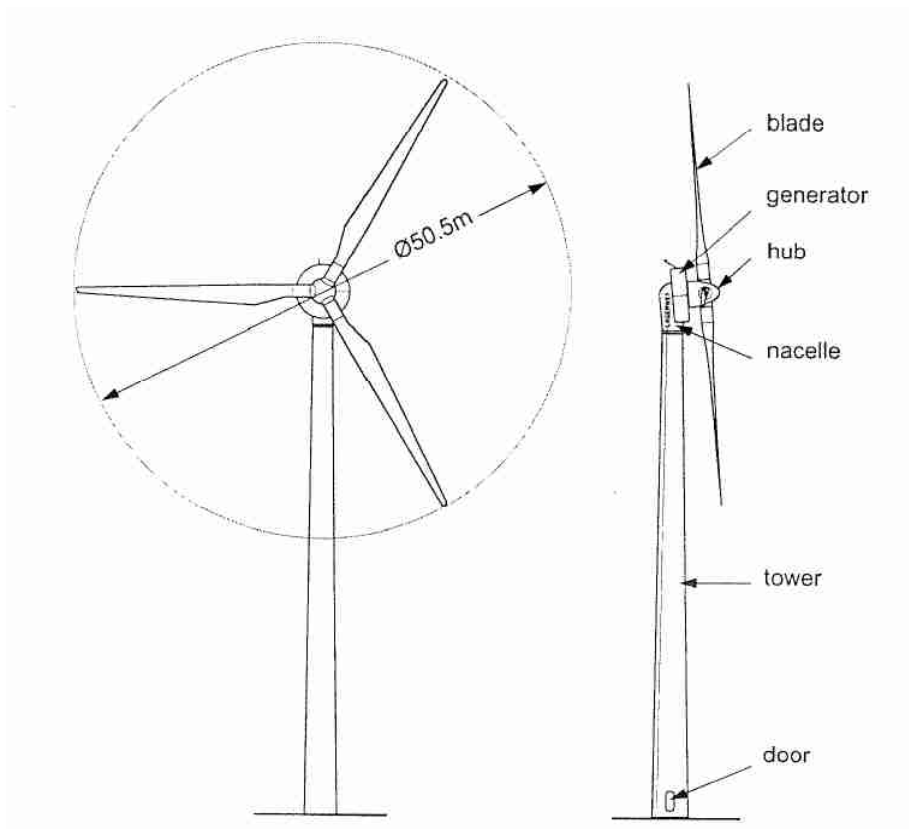
Voor het analyseren van media (wind, golven e.d.) is een gelijksoortige media-sjabloon opgezet (zie bijlage B). In tegenstelling tot het systeem-sjabloon wordt hier alleen ingegaan op een *definiërend gedeelte*. Dit sjabloon richt zich meer op definitie van aspecten, die de gemodelleerde turbinesystemen behoeven om zich realistisch te kunnen gedragen voor het (real-time) te testen besturingssysteem. Deze gegevens zijn niet-vertrouwelijk en als geheel opgenomen in hoofdstuk 5.

3. SYSTEEMANALYSE LW50-750/B2A

3.1 Algemene beschrijving

3.1.1 Concept en specificaties

De LW50-750/B2a is een windturbine waarbij de driebladige turbinerotor direct via de hoofdas met de rotor van de variabel toerengeregelde generator is gekoppeld (direct drive). Tijdens nominaal bedrijf wekt de LW50-750/B2a een nominaal elektrisch vermogen van 750kW op bij een toerental van 27rpm. Middels actieve bladverstelling (elektrisch) naar vaanstand wordt het toerental en aërodynamisch vermogen boven nominale windsnelheden begrensd. De LW50-750/B2a is aan het net gekoppeld via een zogenaamde 'back-to-back converter', dit maakt enerzijds koppelregeling van de generator mogelijk en anderzijds beïnvloeding van het geleverde actieve- en reactieve netvermogen. Het uitlijnen van de gondel wordt gerealiseerd door een elektrisch aangedreven krui-systeem.



Figuur 3-1: aangezicht van de LW50-750/B2a turbine

In het vervolg van deze systeemanalyse wordt veelvuldig gebruik gemaakt van de afkortingen zoals deze in Tabel 3-1 worden verklaard.

Tabel 3-1: verklaring van gebruikte afkortingen in systeemanalyse van LW50-750/B2a.

Afkorting	Betekenis	Omschrijving
TCC	Tower Control Cabinet	Schakelkast begane grond in de toren
NCC	Nacelle Control Cabinet	Schakelkast in de gondel
RCC	Rotor Control Cabinet	Schakelkast in neus van de rotor
N-PLC	Nacelle-PLC	Programeerbare besturingslogica in NCC
R-PLC	Rotor-PLC	Programeerbare besturingslogica in RCC
B2B	Back-to-Back	AC-DC-AC Converter
NTS	Normal Turbine Stop	Turbine stop d.m.v. geregelde bladverstelling
ETS	Emergency Turbine Stop	Turbine noodstop d.m.v. gestuurde bladverstelling

3.1.2 Besturingssysteem

Het besturingssysteem van de LW50-750/B2a heeft als hoofdtak om veilig en efficiënt windturbinebedrijf binnen de turbine ontwerp-specificaties te handhaven door de afzonderlijke componenten en systemen goed te laten functioneren en samenwerken.

Tijdens deze hoofdtak wordt gestreefd naar maximale energieopbrengst en minimale belastingen van turbinedelen en -componenten. Daarnaast vervult het duidelijk ook (gebruikers)functies voor:

- bediening van de turbine (start / stop / auto / hand / service);
- alarmafhandeling (emergency / shutdown / reset);
- monitoring (status / rapportage / history / onderhoud);
- configuratie (parametersetting, software-downloading).

3.2 Systeemanalyse

Als 'te besturen proces' voor het besturingssysteem wordt de LW50-750/B2a zoals weergegeven in Tabel 3-2 onderverdeeld in vier windturbinedelen die elk weer onderverdeeld zijn in systemen (zie ook de probleemanalyse [A2]):

Tabel 3-2: verdeling in windturbinedelen, systemen en systeemdoelen van de LW50-750/B2a.

<i>Windturbinedeel</i>	<i>Systemen</i>	<i>Doel van het systeem ten aanzien van de LW50-750/B2a besturing</i>
Rotor	Bladensysteem	Het omzetten van de door de rotorbladen ondervonden windkrachten in aërodynamisch koppel en axiaalkracht.
	Meteosysteem	Het meten van momentane windsnelheid, windrichting en omgevingstemperatuur ter ondersteuning van de operationele taken van het besturingssysteem, in het bijzonder het krui-systeem.
	Bladverstelsysteem	Verstellen van de bladen om de windturbine, onder wisselende windsnelheidsomstandigheden, binnen haar ontwerpspecificaties te houden (begrenzing rotortoerental, vermogensproductie belastingen) en zo efficiënt mogelijk productiebedrijf na te streven.
Aandrijftrein	Hoofdlager-systeem	Voorkomen van slijtage aan het hoofdlager door te hoge wrijvingsweerstand.
	Generatorbewaking-systeem	Voorkomen dat de temperatuur in de stator- en rotorwikkeling van de generator te hoog wordt.
	Elektrisch conversiesysteem	Het door de rotor aan de hoofdas overgedragen mechanisch koppel omzetten in elektrische energie.
	Transmissiesysteem	Het overdragen van aërodynamisch koppel naar generator-askoppel.
Ondersteuning	Toren- en fundatie-systeem	Ondersteunen van de gondel en voorkomen dat de uitwijkingen hiervan in zowel de voor-/achterwaartse als zijwaartse richting ontoelaatbaar groot worden (onbalans).
	Krui- en retwistsysteem	De rotor uit te lijnen op de gemiddelde windrichting en daarbij te voorkomen dat de generatorkabel teveel torsie ondergaat (twisten).
Algemeen	Beveiligingssysteem	Het veilig afwikkelen van bijzondere situaties zoals service, calamiteiten en (ernstige) storingen aan componenten en systemen.
	Voedingssysteem	Alle elektrische componenten van de windturbine voorzien van een passende en beveiligde elektrische spanning en -stroom die noodzakelijk is om te kunnen functioneren.

Voor processimulatie van de LW50-750/B2a zijn alle bovengenoemde systemen van belang, echter, niet alle systemen hoeven besturingscomponenten te bevatten. Zo bestaat bij het LW50-750/B2a concept het bladensysteem alleen uit fysica (aërodynamische conversie) vanwege het ontbreken van bijvoorbeeld tipremmen en bladtrillingsmetingen. Ook het transmissiesysteem bestaat alleen uit fysica (astorsie) vanwege het ontbreken van een tandwielkast bij dit direct-drive concept.

In de navolgende paragrafen worden per systeem de *definitieresultaten* van de in hoofdstuk 2 besproken analyse methodiek besproken (systeemanalyse voor processimulatie). De *inventarisatieresultaten* zijn terug te vinden in het vertrouwelijke annex : Systeeminventarisatie LW50-750/B2a [A4].

3.2.1 Bladensysteem

componenten

Als componenten worden in dit systeem slechts de afzonderlijke bladen onderkend, de verstelinrichting van de bladen worden aan het bladverstelsysteem (3.2.3) toegekend.

interne systeeminteracties

Interne systeeminteractie wordt onderkend tussen bladeffectieve koppels en axiaal krachten en resulterend rotoeffectief koppel en axiaalkracht.

externe systeeminteracties

- Bladverstelsysteem (bladhoeken);
- Transmissiesysteem (aërodynamisch koppel);
- Toren- en fundatie-systeem (axiaalkracht);
- Krui- en retwistsysteem (aërodynamische kruimomenten);
- Beveiligingssysteem (bladhoeken);
- Wind (windsnelheid, windrichting, rotoeffectief).

samenstelling

De LW50-750/B2a turbine hanteert een bladverstelling die actief is in het gebied waar de luchtstroming aan de bladen ligt. De aërodynamische eigenschappen van de rotor zijn dus met name in dit werkgebied van belang.

- tabellen met C_p curven als functie van snellopendheid en bladhoek;
- tabellen met C_t curven als functie van snellopendheid en bladhoek;
- bladdiameter;
- nominale bedrijfscondities (windsnelheid, rotorsnelheid, vermogen, bladhoek);
- tilhoek;
- conehoek.

fenomenen

In het bladensysteem worden voor processimulatie de volgende fenomenen onderscheiden waar hierna kort op wordt ingegaan:

- a. rotoeffectieve aërodynamische conversie;
- b. zogeffecten;
- c. bladeffectief aërodynamisch koppel en axiaalkracht;
- d. scheefstand;
- e. bladzwaai- en bladklapmomenten.

ad a. Rotoreffectieve aërodynamische conversie:

Het aërodynamisch conversieproces van de turbinerotor kan quasi-stationair worden beschreven door niet-lineaire vergelijkingen. Het aërodynamisch koppel T_a [Nm] en de axiaalkracht F_a [N] worden beïnvloed door de zogenaamde 'rotorbrede ' windsnelheid' V_w [m/s], de bladhoek Q [graden] en het rotortoerental W_r [rad/s]. De voor-/achterwaartse torenttranslatie-snelheid wordt hier gemakshalve nog buitenbeschouwing gelaten maar kan tegenwerkend op V_w in rekening worden gebracht. De aërodynamische conversievergelijkingen zijn:

$$T_a = C_q(q, l) \cdot \frac{1}{2} \rho R_b^3 \cdot (V_w)^2$$

$$F_a = C_t(q, l) \cdot \frac{1}{2} \rho R_b^2 \cdot (V_w)^2$$

waarin R_b [m] de rotorstraal is, ρ [kg/m³] de lichte dichtheid en voor de snelheid λ

$$\text{geldt: } I = \frac{\Omega_r \cdot R_b}{V_w}.$$

De koppelcoëfficiënt C_q [-] en de axiaalkrachtcoëfficiënt C_t [-] worden door de bladgeometrie bepaald en vormen met de rotorstraal een essentieel uitgangspunt voor de vorming van aërodynamisch koppel en axiaalkracht. De vermogenscoëfficiënt wordt bepaald volgens:

$$C_p(q, I) = I \cdot C_q(q, I).$$

ad b. Zog-invloeden:

De quasi-stationaire conversievergelijkingen kunnen gecorrigeerd worden voor dynamische zoginvloeden (dynamic inflow). Met name bij het ontwerpen van bladhoekregelingen is gebleken dat dit effect niet zondermeer buiten beschouwing kan worden gelaten, zodat dit ook voor processimulaties van belang is.

Iedere variatie in met name de bladhoek (maar ook toerental en windsnelheid) resulteert in een dynamische overgang naar een nieuwe evenwichtstoestand. Het zoggedrag geeft hieraan een conservatief karakter, wat neigt naar handhaving van de geldende toestand. Dit effect is het sterkst rond nominale condities en voor het aërodynamisch koppel. In [A1] is afgeleid dat dit fenomeen in rekening gebracht kan worden door de bladhoekwaarden in de aërodynamische conversievergelijkingen te beïnvloeden met een fase draaiend netwerk (lead-lag filter).

De na-ijlende (lagging) tijdconstanten in het netwerk zijn voor zowel het aërodynamisch koppel als de axiaalkracht verschillend, de voor-ijlende (leading) tijdconstanten zijn verschillend. Dit resulteert dus in twee verschillende lead-lag filters, waarvan de tijdconstanten bovendien niet-lineair afhankelijk zijn van de (rotorbrede) windsnelheid.

ad c. Bladeeffectief aërodynamisch koppel en axiaalkracht:

De rotorbladen hoeven niet altijd op gelijke wijze te worden versteld, bijvoorbeeld ingeval van een falende bladverstel-inrichting of een regelalgoritme dat de bladen individueel (azimut afhankelijk) verstelt. In plaats van *rotoreffectief* aërodynamisch gedrag wordt dan *bladeeffectief* aërodynamisch gedrag relevant.

De voorgestelde (eenvoudige) benadering voor bladeffectieve bijdragen, definieert een bladgerelateerde koppel- en axiaalkrachtcoëfficiënt. Bij het gelijk verstellen van de rotorbladen resulteren de drie bladeffectieve koppels en axiaalkrachten weer in rotoreffectieve bijdragen.

ad d. Scheefstand van de rotor

Door (plotselinge) windrichtingverandering, krui-onnauwkeurigheden of -fouten, kan er scheefstand van de rotor ontstaan ten opzichte van de aanstromende wind. Hiervoor kan in rotoreffectieve zin een eenvoudige benadering gevolgd worden, door het aanpassen van de vermogenscoëfficiënt en axiaalkrachtcoëfficiënt volgens resultaten uit de moment theorie voor een windturbine met stationaire scheefstand. De invloed hierop verloopt volgens een 'cosinus functie van de scheefstandhoek zodat scheefstandhoeken kleiner dan 10 graden rotoreffectief een relatief kleine invloed hebben.

ad e. Bladzwaai- en bladklapmomenten

Alhoewel er bij de LW50-750/B2a in direct zin geen bladtrillingsmetingen of -detecties ten behoeve van het besturingssysteem zijn opgenomen, is de koppeling van deze bladtrillingen met de toren indirect wel van belang. De gondelversnellingen worden in de gondel gemeten om overmatige uitwijkingen te voorkomen.

De bladzwaai koppeling met de astorsie in de drive train (collectieve zwaai) is bij de LW50-750/B2a minder relevant daar de astijfheid van deze turbine erg hoog is.

Om beide fenomenen op te nemen voor processimulatie volstaat wellicht een additief bladverstoringsmodel ten aanzien van torentopversnellingen (3.2.8) en rotortoerental (3.2.7) dat bij beoordeling van beveiligingsacties als een discrete gebeurtenis (in een zekere mate) wordt geactiveerd.

events

In het bladensysteem wordt voor processimulatie het volgende discrete gedrag onderscheiden:

- bladbreuk (ontstaan van kruimomenten, 3.2.9, die een gondelrotatie willen veroorzaken);
- optreden van bladklap- en/of bladzwaai verstoringen (torenkoppeling, hoofdastrillingen);

Het falen van een bladverstelling is opgenomen in het bladverstelsysteem (3.2.3) en wordt via de bladhoek aan het bladensysteem kenbaar gemaakt.

hardware in the loop

Dit systeem biedt geen mogelijkheden voor 'hardware in the loop'.

3.2.2 Meteosysteem

componenten

Binnen dit systeem worden de volgende componenten voor modellering onderscheiden:

- windsnelheidsmeting;
- windrichtingsmeting;
- temperatuurmeting;

Om meer structuur aan te brengen kan overwogen worden om de afzonderlijke metingen als deelsystemen te benoemen.

interne systeeminteracties

- momentane (gemeten) windsnelheid ter plekke van de anemometer;
- momentane (gemeten) windrichting ter plekke van de windvaan;
- momentane (gemeten) temperatuur ter plekke van de temperatuurmeting.

externe systeeminteracties

- Krui- en retwistsysteem (windrichtingsmeting);
- Windsnelheid en Windrichting (in een vast punt);
- Bladensysteem (zogverstoring);
- Elektrisch conversiesysteem (ventilatiewarmte, omgevingstemperatuur);
- Voedingssysteem (voedingsvoorwaarden).

samenstelling

In het meteosysteem worden voor processimulatie de volgende constante eigenschappen onderscheiden:

- meetcyclustijd, meetresolutie, bandbreedte van de windsnelheids- en windrichtingsmeter;
- pulstal van de windsnelheidssensor (aantal pulsen per omwenteling);
- stabiliseringstijdconstante omgevingstemperatuurmeting;

fenomenen

In het meteosysteem wordt voor processimulatie het volgende continue gedrag onderscheiden:

- dynamisch gedrag van de windsnelheidsensor (delay, meetruis);
- dynamisch gedrag van de windrichtingsensor (delay, meetruis);
- dynamisch gedrag van de omgevingstemperatuursensor;
- signaalbewerking (delay, meetruis, filtering).

events

In het meteosysteem wordt voor processimulatie het volgende discrete gedrag onderscheiden:

- voedingsvoorwaarde voor windsnelheids-, windrichtings- en omgevingstemperatuurmeting;
- falen van elk van de metingen door te laag of te hoog afwijkende meetwaarde;
- falen van elk van de metingen door meetdefect waarbij meetwaarde maximum/minimum wordt tot gevolg;
- falen van de windrichtingsmeting door vastzittende windvaan (vorst, mechanisch);
- falen van de windsnelheidmeting door vastzittend roterende deel (vorst, mechanisch);
- falen van de gemultiplexte ingang.

hardware in the loop

Het hardwarematig opnemen van een windsnelheidsmeting en/of windrichtingsmeting of omgevingstemperatuurmeting heeft weinig potentieel. Enerzijds voegt het weinig toe aan processimulatie en anderzijds is het opwekken van een daarvoor noodzakelijk meetbaar windveld nauwelijks haalbaar (dit zou leiden tot een toerengeregelde ventilator en/of instelbare luchtstroomrichting waarvan het setpoint wordt bepaald door de processimulator).

3.2.3 Bladverstelsysteem

componenten

Binnen dit systeem worden de volgende componenten voor modellering onderscheiden:

- elektrische dc-servo-aandrijving voor elk blad bestaande uit een planetaire overbrenging, een dc-servomotor met actieve rem en een servo toerentalregelaar;
- voor elk blad twee vaanstand-eindschakelaars;
- bladhoekmeting voor elk blad.

Dit systeem kan onderverdeeld worden in drie identieke bladverstellingen voor elk blad afzonderlijk: bladverstel-deelssysteem1, -deelssysteem2 en -deelssysteem3.

interne systeeminteracties

- bladhoek;
- rotortoerental;
- wrijvingskoppel voor bladverstelling;
- opgenomen stroom servoregelaar;
- servomotor-toerental.

externe systeeminteracties

- Bladensysteem (bladhoekafhankelijkheid op aërodynamisch koppel);
- Beveiligingssysteem (interactie NTS en ETS, gemeenschappelijke componenten, rotortoerentalmeting);
- Voedingssysteem (voedingsvoorwaarden).

samenstelling

In het bladverstelsysteem worden voor processimulatie de volgende constante eigenschappen onderscheiden:

- nominale gegevens servoregelaar, servomotor en servorem;
- servoregelaar en -motordynamica als gevolg van bladverstelcommando's;
- actieve rem dynamica (delay);
- bladbuigmoment, bladlager-wrijvingseigenschappen;
- meetresolutie en pulstal bladhoek-encoders;
- nauwkeurigheid van een blad-eindstandschakelaar.

fenomenen

In het bladverstelsysteem wordt voor processimulatie het volgende continue gedrag onderscheiden:

- viskeuze wrijving door bladbuiging in het lager en wrijving in de aandrijving tijdens bladverstelling, en additionele Coulombse wrijving bij richtingsomkering van het blad;
- het dynamische gedrag van de servo-aandrijving op wrijvingskoppelvariaties en toerental-setpointvariaties;
- delay die optreedt bij het activeren en passief maken van de motorrem en het wrijvingskoppel dat wordt gerealiseerd;
- het opgenomen stroomgedrag tijdens bladverstelling van de aandrijving (overbelastingbeveiliging);
- bladhoekmeting.

events

In het bladverstelsysteem wordt voor processimulatie het volgende discrete gedrag onderscheiden:

- voedingsvoorwaarden voor de servo-regelaars, de motorrem, de bladhoek-encoders;
- blad-eindstandschakelaar detecteert vaanpositiestand;
- blad-eindstandschakelaar detecteert vaaneindstand;
- falen van een blad-eindstandschakelaar na passeren vaanpositiestand of vaaneindstand;
- servoregelaar geeft storingstatus;
- onderling verschil in gemeten bladhoekwaarden;
- bladaandrijving wordt niet geëffectueerd naar bladverdraaiing;
- bladaandrijving ondervindt meer dan normale wrijvingsweerstand;
- falen van de bladhoekmeting door een afwijkende meetwaarde bij vaanstand ;
- bladhoekmeting te laag/te hoog gemeten of geeft geen signaal;
- motorrem blijft (gedeeltelijk) actief na commando tot de-activeren;

hardware in the loop

Een servoaandrijving (servoregelaar + servomotor + rem) van het bladverstelsysteem kan prima als 'hardware in the loop' worden opgenomen. De processimulator dient dan wel te voorzien in een belastingkoppelsetpoint voor de bladverstelaandrijving dat door een koppelgeregeld belastingssysteem (hulpactuator) moet worden gerealiseerd. Het setpoint voor het belastingskoppel bevat dan alle (in de simulator beschikbare) fricties die na de motoras optreden. De hulpactuator zou bijvoorbeeld een wervelstroomrem of een koppelgeregelde elektromotor kunnen zijn. Door de belastingskoppels aan de snelle motoras te relateren blijven deze beperkt.

Opname van de bladhoek-encoder is eveneens goed mogelijk, er dient dan wel te worden voorzien in een reductie van motortoerental naar bladhoekverstelsnelheid. Een mechanische reductor ligt het meest voor de hand omdat hierdoor de hulpactuator voor het belasten van de verstelmotor klein kan blijven en omdat dit bovendien het meest overeenstemt met de werkelijkheid.

3.2.4 Hoofdlager-systeem

componenten

Binnen dit systeem worden de volgende componenten voor modellering onderscheiden:

- twee temperatuurmetingen;
- lagersmering (smeerpompje);
- hoofdlager (frictie).

interne systeeminteracties

- smeerflow;
- lagertemperatuur;
- aslagerwrijvingskoppel.

externe systeeminteracties

- Bladverstelsysteem (rotorsnelheid);
- Voedingssysteem (voedingsvoorwaarde).

samenstelling

In het hoofdlager-systeem worden voor processimulatie de volgende constante eigenschappen onderscheiden:

- hoofdlager wrijvingscoëfficiënt afhankelijk van smeerhoeveelheid en krui-snelheid;
- wrijvings-smeertijdconstante hoofdlager;
- temperatuurscoëfficiënt hoofdlager;
- stabiliseringstijdconstante lagertemperatuurmetingen;
- filter gegevens van de temperatuurmetingen.

fenomenen

In het hoofdlager-systeem wordt voor processimulatie het volgende continue gedrag onderscheiden:

- dynamisch gedrag frictiekoppel (wrijvingsgedrag) hoofdlager;
- dynamica hoofdlager temperatuursgedrag (inclusief eigenkoeling door ventilatie) ter plaatse van de temperatuursensoren;
- inschakelinterval smeerpompje;
- dynamisch gedrag van de hoofdlagertemperatuursensoren en signaalbewerking (multiplex en meetdelay, meetruis, filtering).

events

In het hoofdlager-systeem wordt voor processimulatie het volgende discrete gedrag onderscheiden:

- ontbreken van hoofdlagersmering (systeemfalen, het vet is op);
- voedingsvoorwaarde voor lagertemperatuursmetingen en vetpompje;
- falen van de metingen ten aanzien van de meetwaarden;
- forceren van een grenswaarde overschrijding voor lagertemperaturen.

hardware in the loop

Het opnemen van het hoofdlager smeersysteem als hardware in the loop biedt weinig perspectieven.

3.2.5 Generatorbewaking-systeem

componenten

Binnen dit systeem worden de volgende componenten voor modellering onderscheiden:

- statortemperatuurmetingen;
- rotortemperatuurmetingen;
- statortemperatuurdetecties.

Om meer (fysieke) structuur aan te brengen kan overwogen worden om de componenten van het generator-temperatuurbewakingsysteem in twee deel-systemen onder te brengen: generator-statortemperatuur-bewakingsdeelsysteem en een generator-rotortemperatuur-bewakingsdeelsysteem.

interne systeeminteracties

- statortemperaturen;
- rotortemperaturen;
- statortemperatuur-grenswaarde-overschrijding.

externe systeeminteracties

- Elektrisch conversiesysteem;
- Voedingssysteem.

samenstelling

In het generator-temperatuurbewakingsysteem worden voor processimulatie de volgende constante eigenschappen onderscheiden:

- stabiliseringstijdconstante;
- filter gegevens van de temperatuurmetingen.

fenomenen

In het generator-temperatuurbewakingsysteem wordt voor processimulatie het volgende continue gedrag onderscheiden:

- dynamisch gedrag van de temperatuursensoren en signaalbewerking (multiplex en meetdelay, meetruis, filtering).

events

In het generator-temperatuurbewakingsysteem wordt voor processimulatie het volgende discrete gedrag onderscheiden:

- voedingsvoorwaarde voor temperatuursmetingen en detectie;
- falen van afzonderlijke metingen door ongeldige/verkeerde meetwaarde(n);
- falen van afzonderlijke metingen door ontbreken van meetwaarde(n);
- forceren van een te hoge generator-statortemperatuur en/of generator-rotortemperatuur.

hardware in the loop

Het opnemen van het generator-temperatuurbewakingsysteem (sensoren) als hardware in the loop biedt weinig perspectieven. Om de te meten stator- en rotortemperaturen ten behoeve van deze metingen en detecties tot stand te brengen zou dan gedacht moeten worden aan verwarmingselementjes die verwarmd worden tot een uit het elektrisch conversiesysteem bepaalde waarde!

3.2.6 Elektrisch conversiesysteem

componenten

Binnen het elektrisch conversiesysteem worden de volgende componenten voor modellering onderscheiden:

- synchrone generator met permanent magneetrotor;
- B2B-converter met net-converter (netspoelen/-filter), spanningstussenkring met voorlaad-circuit, generator-converter (uitgangspoelen) met rotorbekrachtiging-converter
- netkoppelingsschakelaar;
- netspanningsreferentiemeting;
- kastventilator en –verwarming.

Om meer structuur aan te brengen is het voor de hand liggend om de componenten in twee deelsystemen onder te brengen: converter/generator-deelsysteem en een netkoppeling-deelsysteem.

interne systeeminteracties

- inschakelen netkoppelingsschakelaar;
- actief- en reactief netzijdig vermogen;
- dc-tussenkringspanning en -stroom;
- generator- rotorbekrachtigingsstroom;
- generatorstatorstromen en -spanningen;
- netstromen- en -spanningen;
- elektrisch koppel, -vermogen;
- generatortoerental.

externe systeeminteracties

- Elektriciteitsnet (netspanning, netfrequentie);
- Voedingssysteem (verdeelinrichting turbine, NCC, controller, netkoppeling);
- Meteosysteem (omgevingstemperatuur);
- Beveiligingssysteem (emergency stop, afschakelen converter, gemeten rotortoerental);
- Toren- en fundatie-systeem (zijwaartse torentopbewegingen op elektrisch koppel).

samenstelling

In het elektrisch conversiesysteem worden voor processimulatie de volgende constante eigenschappen onderscheiden:

- aanzuigtemperatuur en -vochtigheid voor TCC-ventilatie;
- in-/uitschakelvertraging netkoppelingsschakelaar;
- koppelsetpoint karakteristiek voor vermogensproductie;
- generatorparameters (nominale gegevens, statorweerstand, lekinductanties, luchtspleetinductantie, verlies);
- converterparameters (verliezen, interne grenswaarden).

fenomenen

In het elektrisch conversiesysteem wordt voor processimulatie het volgende continue gedrag onderscheiden:

- in- en uitschakeldynamica en onderspanningsreactie netkoppelingsschakelaar;
- oplaadgedrag (voorladen, fluctuaties) van de spanningstussenkring;
- vereenvoudigde dynamica voor het converter/generator gedrag waarin de volgende fenomenen zijn opgenomen:
 - regelgedrag van de tussenkringspanning en het reactieve vermogen door net-converter (ontkoppeling door vectorregeling), inclusief de wisselwerking met netspoelen/filter;
 - regelgedrag van het elektrisch koppel door de generator-converter, inclusief de wisselwerking met uitgangspoelen;
 - regelgedrag van het magnetisch veld (flux) door bekrachtiging-converter;

- thermisch gedrag van de B2B-converter door eigen vermogensdissipatie en geforceerde luchtkoeling;
- thermisch gedrag van de generator in de rotor en de stator door vermogensdissipatie, eigenkoeling en voorverwarming;
- dynamisch (eerste orde) gedrag netspanning referentiemeting;
- wisselwerking tussen zijwaartse torentopbewegingen en elektrische koppelvariaties;

events

In het elektrisch conversiesysteem wordt voor processimulatie het volgende discrete gedrag onderscheiden:

- in- uitschakelen netkoppelingsschakelaar;
- in- uitschakelen B2B-converter;
- voedingsvoorwaarde voor netkoppelingsschakelaar, controller, kastventilatie/-verwarming, netspanningsreferentiemeting;
- falen van converter (overbelasting interne fout)
- inschakelen en uitvallen van de kastventilator;
- activeren van het voorladen van de spanningstussenkring;
- uitschakelen converter door deur openen, rookmelding, serviceschakelaar.

hardware in the loop

Het opnemen van de converter met generator als 'hardware in the loop' is vanwege de systeemdimensies (elektrisch, afmetingen, gewicht), veiligheid (hoge spanningen, stromen, koppels) en benodigde hulpsystemen (generator-aandrijving, netkoppeling) zeer ingewikkeld en moeilijk te realiseren. Een mogelijkheid hiervoor zou de testfaciliteit bij de leverancier van de converter en generator zijn, maar vooralsnog wordt het in dit stadium van de processimulator niet voorzien.

De netkoppelingsschakelaar biedt goede mogelijkheden om als 'hardware in the loop' te worden opgenomen. Er dient dan wel voorzien te worden in een hulpsignaal naar de processimulator om de netkoppelingstoestand kenbaar te maken.

3.2.7 Transmissiesysteem

componenten

Binnen het transmissiesysteem wordt alleen de hoofdas voor modellering onderscheiden. De lageraspecten worden beschouwd binnen het Hoofdlager-systeem (3.2.4).

interne systeeminteracties

- as rotatiesnelheid aan de rotorzijde (rotorsnelheid)
- as rotatiesnelheid aan de generatorzijde (generatorsnelheid)

externe systeeminteracties

- Hoofdlager-systeem (lagerwrijving);
- Elektrisch conversiesysteem (generatormassatraagheid, -snelheid, elektrisch koppel);
- Toren- en fundatie-systeem (koppeling met tweede torenbuigmode);
- Bladensysteem (rotorsnelheid, aërodynamisch koppel).

samenstelling

In het transmissiesysteem worden voor processimulatie de volgende constante eigenschappen onderscheiden:

- generator massatraagheid;
- turbinerotor massatraagheid;
- hoofdas-stijfheid, -massa en -dimensies;
- eigenfrequentie hoofdas.

fenomenen

In het transmissiesysteem worden voor processimulatie het volgende continue gedrag onderscheiden:

- dynamische versnelling van de hoofdas door versnellend koppel (rotatievergelijking);
- torsietrillingen die zich manifesteren als een gevolg van hoofdastorsie en asymmetrische bladzwaaitrillingen (verstoringsmodel, zie 3.2.1);

events

In het transmissiesysteem wordt voor processimulatie geen discreet gedrag onderscheiden (hoofdasbreuk of vastlopen hoofdas worden niet relevant geacht)

Hardware in the loop

Dit systeem biedt geen mogelijkheden voor 'hardware in the loop'.

3.2.8 Toren- en fundatie-systeem

componenten

Binnen dit systeem worden de volgende componenten voor modellering onderscheiden:

- toren;
- fundatie;
- versnellingsopnemer in x- en y-richting;
- banddoorlaatfilter en laagdoorlaatfilter versnellingsignalen

interne systeemin interacties

- torentopuitwijking, -snelheid, -versnelling;
- buigmoment torenvoet;
- gondelversnelling in x-richting;
- gondelversnelling in y-richting;
- onbalans grenswaarde-overschrijding.

externe systeemin interacties

- Krui- en retwistsysteem(tiltkoppels);
- Bladensysteem (axiaalkracht, bladklapbewegingen);
- Elektrisch conversiesysteem (generatorkoppelreactie);
- Transmissiesysteem (astorsiekoppeling met tweede torenbuigmode);
- Golven (torentopeffectieve golfkrachten);
- Grond (fundatiestijfheid);
- Voedingssysteem (voedingsvoorwaarden).

samenstelling

In het toren- en fundatiesysteem worden voor processimulatie de volgende constante eigenschappen onderscheiden:

- torenmassa;
- torentopmassa (totale gondelmasa incl. rotor);
- tilthoek;
- toreneigenfrequentie, -stijfheid, -structurele demping;
- fundatiestijfheid;
- meetcyclustijd, meetresolutie, bandbreedte van de versnellingssensoren;
- BP en LP filterparameters (bandbreedte, orde);
- grenswaarden en tijdspanne voor onbalans alarm.

fenomenen

In het toren- en fundatiesysteem wordt voor processimulatie het volgende continue gedrag onderscheiden:

- Eerste buigmode torendynamica:
De eerste zijwaartse en voor-/achterwaartse buigmode van de toren kunnen als een massa-veer-equivalent axi-symmetrisch worden gemodelleerd. De belastingsinvloeden worden dan vertaald naar zogenaamde torentop equivalente krachten.
De torenbuiging in zijwaartse richting wordt veroorzaakt door elektrische koppelvariaties die reacties op de torentop uitoefenen (3.2.6). De torenbuiging in voor-/achterwaartse richting wordt veroorzaakt door de axiaalkracht (3.2.1). De uitwijking van de toren in deze richting kan verdisconteerd worden in de windsnelheid die de rotor ondervindt (5.1). De demping in voor-/achterwaartse richting wordt vergroot door de dempende werking van de rotor (aërodynamische demping). Verder ondervindt de torentop de gevolgen van hydrodynamische golfkrachten tegen de voet van de toren, dit kan afhankelijk van de aanstroomhoek zowel in voor-/achterwaartse richting en/of in zijwaartse richting zijn (torentopeffectieve golfkrachten, 5.2).

Onderstaande betrekkingen beschrijven de torendynamica volgens de voorgestelde benadering (massa-veer-demper)³:

$$m_t \cdot \ddot{x}_{nd} + k_t \cdot \dot{x}_{nd} + c_t \cdot x_{nd} = F_{nd}^{topeqv}$$

$$m_t \cdot \ddot{x}_{ny} + k_t \cdot \dot{x}_{ny} + c_t \cdot x_{ny} = F_{ny}^{topeqv}$$

De vergelijkingen worden gedimensioneerd door de torentop-effectieve massa, en equivalente stijfheid en demping. De dynamica wordt in beide richtingen geëxciteerd door een samenstel van torentop equivalente krachten.

- Torsie vervorming van de toren:
Iedere kruibeweging van de gondel veroorzaakt een reactiekoppel dat ten aanzien van de toren in torsie vervorming resulteert. Voor een buistoren (zoals de LW50-750/B2a) is dit effect vanwege de hoge torsiestijfheid verwaarloosbaar. Het veronderstellen van een oneindig hoge torsiestijfheid zal derhalve gerechtvaardigd blijken.
- Kruimomenten:
Door kruien ontstaat als gevolg van de gyroscopische werking een tilt koppel dat de toren in voor-/achterwaartse beweging belast met een torentop-effectieve kracht ter grootte $3/2 T_{tilt}/Z_t$. Deze extra kracht op die de torentop ondervindt, benadrukt de interactie tussen kruien en torenbewegingen. Ook de door bladbreuk/bladverlies tot stand gekomen kruimomenten krijgen hierdoor dus invloed op de bewegingen van de toren(top).
- Fundatiegedrag:
Ten aanzien van de fundatie wordt enkel een variatie in stijfheid onderkend (zie 5.3). Dynamisch gedrag zoals (ingeval van offshore) zandophoping e.d. worden vooralsnog buiten beschouwing gelaten.

Verder worden ten aanzien van onbalans nog als fenomenen onderkend:

- dynamisch gedrag van de versnellingsmeting voor/achterwaarts (delay, meetruis)
- dynamisch gedrag van de versnellingsmeting zijwaarts (delay, meetruis)
- dynamisch (filter)gedrag onbalans alarm

events

In het toren- en fundatiesysteem wordt voor processimulatie het volgende discrete gedrag onderscheiden:

- creëren van een toren(top)excitatie door (onbepaalde) externe invloed;
- voedingsvoorwaarde voor versnellingsmetingen;
- aanspreken vectorieel onbalansalarm;
- falen van de (afzonderlijke) metingen door te laag/te hoog afwijkende of niet variërende meetwaarde;
- falen van de (afzonderlijke) metingen door meetdefect waarbij meetwaarde max/min wordt.

hardware in the loop

Als het toren- en fundatiesysteem als 'hardware in the loop' zou worden opgenomen, dan zou hier slechts de onbalansdetectie voor in aanmerking komen. Hiertoe is dan een hulpsysteem vereist dat de gondeltrillingen en bewegingen onder momentane (simulatie) omstandigheden ten behoeve van de versnellingsopnemers realiseert. Deze complexiteit weegt geenszins op tegen de beperkt toegevoegde waarde van deze 'hardware in the loop'.

Het opnemen van onbalansdetectie als 'hardware in the loop' is derhalve geen optie.

³ Als hogere buigvormen beschreven dienen te worden voldoet deze benadering niet meer, er dient dan een ingewikkelder zogeheten lumped parameter model (LPM) te worden gehanteerd.

3.2.9 Krui- en retwistsysteem

componenten:

Binnen dit systeem worden de volgende componenten voor modellering onderscheiden:

- direct ingeschakelde asynchrone motoren, mechanisch gekoppeld via een tandradbaan;
- transmissie kruimotortoerental naar gondelrotatie;
- mechanische belasting (lager- en remfrictie, aërodynamisch krui-koppel);
- gondel (massatraagheid);
- thermische motorbeveiligingen;
- twistmeting .

Om meer structuur aan te brengen kan overwogen worden om de componenten van dit systeem in twee deel-systemen onder te brengen: krui-deelsysteem en retwist-deelsysteem.

interne systeeminteracties:

- elektrisch (motor)koppel, toerental;
- mechanisch belastingskoppel (frictie, aërodynamisch);
- statorstroom kruimotoren (beveiliging).

externe systeeminteracties:

- Bladensysteem(axiaalkracht);
- Meteosysteem (windrichtingsmeting, windsnelheidsmeting);
- Toren- en fundatie-systeem (torentorsie);
- Wind (rotoreffectieve windsnelheid en windrichting).

samenstelling:

In het krui- en retwistsysteem worden voor processimulatie de volgende constante eigenschappen onderscheiden:

- massatraagheid kruimotor;
- parameters voor vorming stationair aandrijvend elektrisch koppel (Kloss);
- karakteristieke parameters (Ixt-gedrag) van een overstroom/overbelastingsbeveiliging;
- massatraagheid gondel inclusief rotor;
- wrijvingscoëfficiënt kruilager, coulombse wrijving bij omkering van draairichting;
- wrijvingscoëfficiënt passieve kruiseem, coulombse wrijving bij omkering van draairichting;
- transmissieverhouding kruiseemoverbrenging;
- overdracht en transmissieverhouding gondelrotatie naar twistensorrotatie;
- filter gegevens van de twistmeting;
- rotor dimensies en rotormassatraagheid (diameter, massa);
- aërodynamische thrusteigenschappen rotor (Ct);
- tilthoek, conehoek.

fenomenen

In het krui- en retwistsysteem wordt voor processimulatie het volgende continue gedrag onderscheiden:

- dynamisch model voor het (aanloop)koppel en -stroomgedrag van de kruimotoren;
- dynamica belastingskoppel (wrijvingsgedrag) door kruilager en passieve kruiseem;
- door stochastische windrichtings- en windsnelheidsveranderingen veroorzaakte aërodynamische krui-koppel (belasting kruimotoren) en de gyroscopische uitwerking daarvan op de toren (voor-/achterwaartse torenbeweging);
- dynamisch gedrag twistmeting inclusief signaalverwerking (multiplexdelay).

events

In het krui- en retwistsysteem wordt voor processimulatie het volgende discrete gedrag onderscheiden:

- automatisch linksom/rechtsom inschakelen kruimotoren vanuit besturingssysteem;
- handmatig inschakelen linksom en rechtsom kruien;
- in/uitschakelen kruimotoren met werkschakelaar;
- voedingsvoorwaarde hoofdstroom (hoofdstroombeveiligingen en -schakelaars);
- voedingsvoorwaarde stuurstroom (vergrendelingen en fuses);
- maximale twistwaarde bereikt;
- twistalarm creëren (falen twistmeting);
- rookmelding creëren.

hardware in the loop

Het hardwarematig opnemen van een of meerdere kruimotoren inclusief de hoofdstroom schakel- en beveiligingsinrichting en transmissie is een goede mogelijkheid.

De simulator moet dan per kruimotor wel voorzien in een aan de scheefstand gerelateerd belastingskoppel (inclusief lager en remfrictie) dat middels een extra benodigde mechanische rem op de motoras (hulpactuatoren) wordt geëffectueerd.

Ook voor de twistmeting is er als 'hardware in the loop' een goede mogelijkheid. Als dit in combinatie is met een kruimotor, dan moet worden voorzien in een extra benodigde overbrenging van kruimotortoerental naar twistsensor-rotatie (hulpactuator). Zonder kruimotor dient de simulator een representatief toerental uit te geven t.b.v. een extra benodigde twistensoraandrijving (bijvoorbeeld een dc-motortje als hulpactuator).

3.2.10 Beveiligingssysteem

componenten

Binnen dit systeem worden de volgende componenten voor modellering onderscheiden:

- Een emergency circuit voor elk blad afzonderlijk dat door triggering (watchdog, overspeedschakelaars, voedingsspanningsfout), de bladverstelmotoren overschakelt naar accuvoeding, de rem ontkoppeld en de servoregelaar uitschakelt, totdat een vaanstand-eindschakelaar wordt gepasseerd;
- acculader voor ieder noodverstelsysteem;
- accu voor ieder noodverstelsysteem en meetafkapping voor accutest;
- accu test circuit door selectie vanuit de R-PLC de accuspanning meet en aanbiedt aan een meetingang van de R-PLC;
- rotortoerentalmeting;

Dit systeem kan onderverdeeld worden in drie identieke noodverstel-deelsystemen voor elk blad afzonderlijk en een accutest-deelsysteem.

interne systeemin interacties

- opgenomen motorstroom; motor-askoppel;
- accuspanning;
- noodverstelling;
- serviceschakelaar;

externe systeemin interacties

- Bladverstelsysteem (gemeten rotortoerental, bladhoeken, servocommando's);
- Transmissiesysteem (generatortoerental);
- Voedingssysteem (voedingsvoorwaarden).

samenstelling

In het beveiligingssysteem wordt voor processimulatie het volgende constante eigenschappen onderscheiden:

- parameters voor vorming stationair aandrijvend elektrisch koppel dc-motor;
- accuspecificaties (spanning, capaciteit, inwendige weerstand, laadgedrag);
- schakelgedrag overspeedschakelaars (hysteresis, nauwkeurigheid);
- nauwkeurigheid van een blad-eindstandschakelaar;
- meetresolutie en pulstal toerental-encoder.

fenomenen

In het beveiligingssysteem wordt voor processimulatie het volgende continue gedrag onderscheiden:

- dynamisch model voor accuspanningsvariaties t.g.v. belastingsstroom;
- accu laadgedrag (eerste orde gedrag);
- dynamisch model voor het (aanloop)koppel en -stroomgedrag van dc-motoren;
- meting van accuspanning;
- toerentalmeting;

events

In het beveiligingssysteem wordt voor processimulatie het volgende discrete gedrag onderscheiden:

- omschakelen naar noodverstelling;
- in/uitschakelen serviceschakelaar;
- watchdog activeert emergency circuit;
- emergency melding aan PLC;
- overspeedschakelaar(s) activeren emergency-circuit
- voedingsvoorwaarde accu-laadcircuit;
- voedingsvoorwaarde emergency circuit vanuit accu;
- voedingsvoorwaarde voor de toerental-encoder;
- blad-eindstandschakelaar detecteert vaanpositiestand;
- blad-eindstandschakelaar detecteert vaaneindstand;
- blad-eindstandschakelaar vaanpositiestand faalt of reageert te vroeg;
- blad-eindstandschakelaar eindpositiestand faalt of reageert te vroeg;
- omschakelingsrelais faalt (contacten kleven);
- servicerem blokkeert de rotor of geeft teveel weerstand;
- motor functioneert niet;
- selectie van te meten accuspanning bij accutest;
- accu-capaciteit is te laag;
- toerentalmeting te laag/te hoog gemeten of geeft geen signaal.

hardware in the loop

Het opnemen van het emergency circuit als 'hardware in the loop' is vanwege het belang van het circuit zeer gewenst. Gezien de mogelijkheden zoals die geschetst zijn bij het bladverstelsysteem (3.2.3) is dit praktisch goed realiseerbaar.

Om de noodverstelling toe te voegen als 'hardware in the loop' zijn de volgende uitbreidingen nodig:

- toepassing van de emergency functionaliteit;
- accucellen (eventueel hulpvoedingen);
- omschakelaar die de verstelmotor aan de accu koppelt of aan de servoregelaar.

De watchdog vanaf de R-PLC zal het emergency circuit direct activeren bij een gesimuleerde ETS. De accu kan eventueel door de acculader (bij)geladen worden, er is dan wel een extra hulpvoeding nodig, maar het acculadercircuit wordt dan ook meteen getest.

Als tevens de blad-eindstandschakelaars (werkelijke of kleinere) worden opgenomen, ontstaat er een 'hardware in the loop' configuratie dat een aanzienlijke toegevoegde waarde heeft om vooraf:

- het bladverstelalgoritme tijdens normaal bedrijf te testen (toerenregelen, NTS);
- de noodverstelling te testen (periodiek test, ETS);
- de accuspannings-test uit te voeren (bladverstelsnelheid, accuspanning);
- de bladhoekmetingen te testen (afwijking bij vaanstand);

Het toevoegen van de overspeedschakelaars als 'hardware in the loop' voegt weinig toe (eenvoudig te creëren door dit fail-safe circuit te onderbreken).

3.2.11 Voedingssysteem

componenten

Binnen dit systeem worden de volgende componenten voor modellering onderscheiden:

- smeltveiligheid;
- drie fasen transformator;
- beveiligingsschakelaar tegen overstroom en overbelasting;
- gelijkrichter;
- aardlekschakelaar.

interne systeeminteracties

Interne systeem interacties tussen de componenten worden tot stand gebracht door een zogenaamde voedingsvoorwaarde voor iedere component of systeem. De voedingsvoorwaarde bestaat uit een keten van beveiligingsschakelaars, de benodigde voedingsfase(n) en conversies.

externe systeeminteracties

- Elektriciteitsnet (netspanning);
- Meteorosysteem (windsnelheid-, windrichting-, omgevingstemperatuurmeting);
- Bladverstelsysteem (servoregelaars, rotorsnelheidsmeting, EM-remmen, bladhoekencoders);
- Hoofdlager-systeem (hoofdlager temperatuurmetingen, smeerpompje);
- Generatorbewaking-systeem (stator- en rotor-temperatuurmeting, -detecties,);
- Elektrisch conversiesysteem (kastconditionering, controller-voeding, netkoppelings-schakelaar, netspanningsreferentiemeting);
- Toren- en fundatie-systeem (onbalansmetingen);
- Krui- en retwistsysteem (twistmeting, windrichtingsmeting);
- Beveiligingssysteem (accu's, lader, accuspanningtest, emerg. circuit, overspeeddetectie);
- N-PLC, R-PLC.

samenstelling

In het voedingssysteem worden voor processimulatie de volgende constante eigenschappen onderscheiden:

- karakteristieke parameters (Ixt-gedrag) van een overstroom/overbelastingsbeveiliging;
- parameters voor transformatormodel (primaire/secundaire weerstand, lekinductiviteit, hoofdinductiviteit, wikkelingverhouding, nominale gegevens).

fenomenen

In het voedingssysteem wordt voor processimulatie het volgende continue gedrag onderscheiden:

- de invloed van een lagere voedingsspanning op het gedrag van systemen of componenten, die gevoed worden door een niet gestabiliseerde voedingsspanning (bijvoorbeeld door uitschakelen na het passeren van een bepaalde drempelwaarde);
- quasi-stationair gedrag van een drie fasen transformator t.b.v. componenten of systemen in hoofdstroomketens die direct gevoed worden (kruimotoren);
- het Ixt gedrag van een beveiligingsschakelaar t.b.v. componenten of systemen in hoofdstroomketens die direct gevoed worden (kruimotoren).

events

In het voedingssysteem wordt voor processimulatie het volgende discrete gedrag onderscheiden:

- aanspreken van iedere willekeurige beveiligingsschakelaar;
- aanspreken van een aardlekschakelaar;
- uitvallen van één, twee willekeurige voedingsfase(n);
- uitvallen van een driefasenvoeding naar NCC, RCC (hoofdschakelaar, breuk, sleeping);
- het wegvallen (smeltveiligheid, gelijkrichter) van een willekeurige stuurspanning (24Vdc circuit).

hardware in the loop

Het opnemen van het voedingssysteem of delen daarvan als 'hardware in the loop' is niet zinvol, er is geen toegevoegde waarde ten aanzien van simulatie in de processimulator.

Zodra een ander systeem wordt opgenomen als 'hardware in the loop' kan dit wel gevolgen hebben voor het voedingssysteem: het wel of niet aanwezig zijn van voeding (geleverd door een externe hulpbron) dient dan niet langer door de processimulator gemodelleerd te worden en aan het besturingssysteem kenbaar gemaakt te worden.

4. SYSTEEMANALYSE NW62/3/1000

4.1 Algemene beschrijving

4.1.1 Concept en specificaties

De NW62/3/1000 is een driebladige turbine, overtrek-geregeld (pitch to stall) en wordt bedreven op twee toerentallen. Tijdens nominaal bedrijf wekt de turbine bij laagtoerental (12.3rpm) een vermogen op van 0.3MW en bij hoog toerental (18.5rpm) een vermogen van 1MW. Het vermogen wordt met actieve bladverstelling (hydraulisch) naar overtrek gereduceerd (inverse pitch control). De twee toeren generator is via een softstarter direct aan het net gekoppeld. Ook toerentalregulatie tijdens het opstarten als hoog-laag toerental overgangen worden door de bladverstelling tot stand gebracht. Het uitlijnen van de gondel op de wind wordt gerealiseerd door een elektrisch aangedreven kruis-systeem.



Figuur 4-1: NW62/3/1000 turbine.

Van deze turbine heeft geen serieproductie plaatsgevonden (er zijn in totaal twee prototypes gebouwd, waarvan er één operationeel is).

4.1.2 Besturingssysteem structuur

In het besturingssysteem van de NW62/3/1000 turbine zijn de volgende functies ondergebracht:

- bedrijfsvoering van de turbine: dit omvat de bedrijfsvoering van de turbine, afhankelijk van operator command's, interne- en externe omstandigheden;
- besturing van deelsystemen: dit omvat de besturing en bewaking van de afzonderlijke deelsystemen;
- beveiliging van turbine: dit omvat de beveiliging van de turbine, zowel t.a.v. personeel als de installatie zelf;
- regeling van deelsystemen: dit omvat de toerental en vermogensregeling van de turbine via de bladhoekregeling en een aantal temperatuurregelingen;
- monitoring;
- mens-machine interfaces.

Deze functies zijn gerealiseerd in een aantal PLC's, logische schakelingen van relais en zekeringen en hydraulische voorzieningen.

4.1.3 Besturings- en beveiligingsstrategie

De turbinebesturing maakt onderscheid in 7 windturbinetstanden:

1. *Basic wind turbine states*
 - ON (operating)
 - OFF (parking state)
 - SOFT_OFF (parking state)
 - SUPERVISOR_MODE (parking state)
2. *Intermediate wind turbine states*
 - NORMAL_STOP
 - SOFT_STOP
 - EMERGENCY STOP

Het stoppen van de windturbine kan worden uitgevoerd via het bladverstelsysteem alleen of via de bladverstelling en de mechanische rem tegelijkertijd. Tijdens de normale bedrijfsvoering en tijdens faalsituaties wordt er altijd naar gestreefd de turbine via het bladverstelsysteem te stoppen. Alleen in geval van ernstige faalsituaties of wanneer het veiligheidssysteem wordt onderbroken zal een emergency stop worden uitgevoerd, waarbij ook de mechanische rem wordt vastgezet.

4.2 Systeemanalyse

Als 'te besturen proces' voor het besturingssysteem wordt de NW62/3/1000 zoals weergegeven in Tabel 4-1 onderverdeeld in vier windturbinedelen die elk weer onderverdeeld zijn in systemen (zie ook de probleemanalyse [A2]):

Tabel 4-1: verdeling in windturbinedelen, systemen en systeemdoelen van de NW62/3/1000.

<i>Windturbinedeel</i>	<i>Systemen</i>	<i>Doel van het systeem ten aanzien van de NW62/3/1000 besturing</i>
Rotor	Bladensysteem	Het omzetten van de door de rotorbladen ondervonden windkrachten in aërodynamisch koppel en axiaalkracht.
	Meteosysteem	Het meten van momentane windsnelheid, windrichting en omgevingstemperatuur ter ondersteuning van de operationele taken van het besturingssysteem, in het bijzonder het kruisysteem.
	Bladverstelsysteem	Verstellen van de bladen om de windturbine, onder wisselende windsnelheidsomstandigheden, binnen haar ontwerpspecificaties te houden (begrenzing rotortoerental, vermogensproductie belastingen) en zo efficiënt mogelijk productiebedrijf na te streven.
Aandrijftrein	Remsysteem	Het tot stilstand brengen van de rotor tijdens normaal bedrijf, netuitval en noodsituaties
	Elektrisch conversiesysteem	Het door het transmissiesysteem aan de generator aangeboden mechanisch vermogen omzetten in elektrisch vermogen in een vorm die geschikt is voor elektriciteitsnet.
	Transmissiesysteem	Vermogensoverdracht en -conversie van aërodynamisch vermogen aan de rotor (laag toerental, hoog koppel) naar asvermogen van de generator (hoog toerental, laag koppel).
Ondersteuning	Toren- en fundatiesysteem	Ondersteunen van de gondel en detectie van torentrillingen.
	Krui- en retwistsysteem	De rotor uit te lijnen op de gemiddelde windrichting en daarbij te voorkomen dat de generatorkabel teveel torsie ondergaat (twisten).
Algemeen	Bedienings- en beveiligingsysteem	Het veilig afwikkelen van bijzondere situaties zoals service, calamiteiten en (ernstige) storingen aan componenten en systemen.
	Voedingssysteem	Alle elektrische componenten van de windturbine voorzien van een passende en beveiligde elektrische spanning en -stroom die noodzakelijk is om te kunnen functioneren.

Voor processimulatie van de NW62/3/1000 zijn alle bovengenoemde systemen van belang, echter, niet alle systemen hoeven besturingscomponenten te bevatten. Zo bestaat bij het NW62/3/1000 concept het bladensysteem alleen uit fysica (aërodynamische conversie) vanwege het ontbreken van bijvoorbeeld tipremmen en bladtrillingsmetingen.

In de navolgende paragrafen worden per systeem de *definitieresultaten* van de in hoofdstuk 2 besproken analyse methodiek besproken (systeemanalyse voor processimulatie). De *inventarisatieresultaten* zijn terug te vinden in het vertrouwelijke annex : Systeeminventarisatie NW62/3/1000 [A5].

4.2.1 Bladensysteem

componenten

Als componenten worden in dit systeem slechts de afzonderlijke bladen onderkend, de verstelinrichting van de bladen worden aan het bladverstelsysteem (4.2.3) toegekend.

interne systeeminteracties

Interne systeeminteractie wordt onderkend tussen bladeffectieve koppels en axiaalkrachten en resulterend rotoeffectief koppel en axiaalkracht.

externe systeeminteracties

- Bladverstelsysteem (bladhoeken);
- Transmissiesysteem (aërodynamisch koppel);
- Toren- en fundatiesysteem (axiaalkracht);
- Krui- en retwistsysteem (aërodynamische kruimomenten);
- Bedienings- en beveiligingsysteem (bladhoeken);
- Wind (windrichting, windsnelheid, rotoeffectief).

samenstelling

De NW62/3/1000 turbine hanteert een bladverstelling die actief is in het gebied waar de luchtstroming de bladen loslaat. De aërodynamische eigenschappen van de rotor zijn dus met name in het overtrekgebied van belang.

- tabellen met C_p curven als functie van snellopendheid en bladhoek;
- tabellen met C_t curven als functie van snellopendheid en bladhoek;
- bladdiameter;
- nominale bedrijfscondities (windsnelheid, rotorsnelheid, vermogen, bladhoek);
- tilthoek;
- conehoek.

fenomenen

In het bladensysteem worden voor processimulatie de volgende fenomenen onderscheiden waar hierna kort op wordt ingegaan:

- a. rotoeffectieve aërodynamische conversie;
- b. zogeffecten;
- c. bladeffectief aërodynamisch koppel en axiaalkracht;
- d. scheefstand;
- e. bladzwaai- en bladklapmomenten.

ad a. Rotoreffectieve aërodynamische conversie:

Het aërodynamisch conversieproces van de turbinerotor kan quasi-stationair worden beschreven door niet-lineaire vergelijkingen. Het aërodynamisch koppel T_a [Nm] en de axiaalkracht F_a [N] worden beïnvloed door de zogenaamde 'rotorbrede ' windsnelheid' V_w [m/s], de bladhoek Q [graden] en het rotortoerental W_r [rad/s]. De voor-/achterwaartse torenttranslatie-snelheid wordt hier gemakshalve nog buitenbeschouwing gelaten maar kan tegenwerkend op V_w in rekening worden gebracht. De aërodynamische conversievergelijkingen zijn:

$$T_a = C_q(q, l) \cdot \frac{1}{2} \rho R_b^3 \cdot (V_w)^2$$

$$F_a = C_t(q, l) \cdot \frac{1}{2} \rho R_b^2 \cdot (V_w)^2$$

waarin R_b [m] de rotorstraal is, ρ [kg/m³] de lichte dichtheid en voor de snelheid λ

$$\text{geldt: } \Gamma = \frac{\Omega_r \cdot R_b}{V_w}.$$

De koppelcoëfficiënt C_q [-] en de axiaalkrachtcoëfficiënt C_t [-] worden door de blad geometrie bepaald en vormen met de rotorstraal een essentieel uitgangspunt voor de vorming van aërodynamisch koppel en axiaalkracht. De vermogenscoëfficiënt wordt bepaald volgens:

$$C_p(q, \Gamma) = \Gamma \cdot C_q(q, \Gamma).$$

ad b. Zog-invloeden:

De quasi-stationaire conversievergelijkingen kunnen gecorrigeerd worden voor dynamische zoginvloeden (dynamic inflow). Met name bij het ontwerpen van bladhoekregelingen is gebleken dat dit effect niet zondermeer buiten beschouwing kan worden gelaten, zodat dit ook voor processimulaties van belang is.

Iedere variatie in met name de bladhoek (maar ook toerental en windsnelheid) resulteert in een dynamische overgang naar een nieuwe evenwichtstoestand. Het zoggedrag geeft hieraan een conservatief karakter, wat neigt naar handhaving van de geldende toestand. Dit effect is het sterkst rond nominale condities en voor het aërodynamisch koppel. In [A1] is afgeleid dat dit fenomeen in rekening gebracht kan worden door de bladhoekwaarden in de aërodynamische conversievergelijkingen te beïnvloeden met een fase draaiend netwerk (lead-lag filter).

De naijlende (lagging) tijdconstanten in het netwerk zijn voor zowel het aërodynamisch koppel als de axiaalkracht verschillend, de voorijlende (leading) tijdconstanten zijn verschillend. Dit resulteert dus in twee verschillende lead-lag filters, waarvan de tijdconstanten bovendien niet-lineair afhankelijk zijn van de (rotorbrede) windsnelheid.

ad c. Bladeeffectief aërodynamisch koppel en axiaalkracht:

De rotorbladen hoeven niet altijd op gelijke wijze te worden versteld, bijvoorbeeld ingeval van een falende bladverstel-inrichting of een regelalgoritme dat de bladen individueel (azimut afhankelijk) verstelt. In plaats van *rotoreffectief* aërodynamisch gedrag wordt dan *bladeeffectief* aërodynamisch gedrag relevant.

De voorgestelde (eenvoudige) benadering voor bladeffectieve bijdragen, definieert een bladgerelateerde koppel- en axiaalkrachtcoëfficiënt. Bij het gelijk verstellen van de rotorbladen resulteren de drie bladeffectieve koppels en axiaalkrachten weer in rotoreffectieve bijdragen.

ad d. Scheefstand van de rotor

Door (plotselingen) windrichtingsverandering, krui-onnauwkeurigheden of -fouten, kan er scheefstand van de rotor ontstaan ten opzichte van de aanstromende wind. Hiervoor kan in rotoreffectieve zin een eenvoudige benadering gevolgd worden, door het aanpassen van de vermogenscoëfficiënt en axiaalkrachtcoëfficiënt volgens resultaten uit de moment theorie voor een windturbine met stationaire scheefstand. De invloed hierop verloopt volgens een 'cosinus functie van de scheefstandshoek' zodat scheefstand-hoeken kleiner dan 10 graden rotoreffectief gezien een bescheiden invloed hebben.

ad e. Bladzwaai- en bladklapmomenten:

Alhoewel er bij de NW62/3/1000 in direct zin geen bladtrillingsmetingen of -detecties ten behoeve van het besturingssysteem zijn opgenomen, is de koppeling van deze bladtrillingen met de toren indirect wel van belang. De gondelversnellingen worden in de gondel gemeten om overmatige uitwijkingen te voorkomen.

De bladzwaai-koppeling met de astorsie in de drive train (collectieve zwaai) is bij de NW62/3/1000 zeker een relevant fenomeen vanwege de relatief lange as en de aanwezigheid van de tandwielkast.

Om beide fenomenen op te nemen voor processimulatie volstaat wellicht een additief bladverstoringsmodel ten aanzien van torentopversnellingen (4.2.7) en rotortoerental (4.2.9) dat bij beoordeling van beveiligingsacties als een discrete gebeurtenis (in een zekere mate) wordt geactiveerd.

events

In het meteosysteem wordt voor processimulatie het volgende discrete gedrag onderscheiden:

- bladbreuk (ontstaan van kruimomenten, 4.2.8, die een gondelrotatie willen veroorzaken);
- optreden van bladklap- en/of bladzwaai-verstoringen (torenkoppeling, hoofdastrillingen).

Het falen van een bladverstelling is opgenomen in het bladverstelsysteem (4.2.3) en wordt via de bladhoek aan het bladensysteem kenbaar gemaakt.

hardware in the loop

Dit systeem biedt geen mogelijkheden voor 'hardware in the loop'.

4.2.2 Meteosysteem

componenten

Binnen dit systeem worden de volgende componenten voor modellering onderscheiden:

- windsnelheidsmeting met verwarmingsselement;
- windrichtingsmeting met verwarmingsselement;
- temperatuurmeting;

interne systeeminteracties

- momentane (gemeten) windsnelheid ter plekke van de anemometer;
- momentane (gemeten) windrichting ter plekke van de windvaan;
- momentane (gemeten) temperatuur ter plekke van de temperatuurmeting.

externe systeeminteracties

- Krui- en retwistsysteem(windrichtingsmeting);
- Wind (in een vast punt);
- Bladensysteem (zogverstoring);
- Voedingssysteem (voedingsvoorwaarden).

samenstelling

In het meteosysteem worden voor processimulatie de volgende constante eigenschappen onderscheiden:

- meetcyclustijd, meetresolutie, bandbreedte van de windsnelheidssensor;
- meetresolutie van de windrichtingsmeter;
- pulstal van de windsnelheidssensor (aantal pulsen per omwenteling);
- stabiliseringstijdconstante omgevingstemperatuurmeting;
- mechanische eigenschappen van de roterende sensoren (lagerwrijving, massatraagheid, temperatuursinvloeden op meetwaarde).

fenomenen

In het meteosysteem wordt voor processimulatie het volgende continue gedrag onderscheiden:

- zogeffecten t.a.v. windsnelheid en windrichting;
- dynamische gedrag van snelheids- en richtingsensor;
- meetsignaalbewerking (filtering, conversie);
- delay en meetruis van sensoren;
- ijsafzetting en bevriezen en sensorgedrag;
- invloed van torenbewegingen op sensoren.

events

In het meteosysteem wordt voor processimulatie het volgende discrete gedrag onderscheiden:

- voedingsvoorwaarde voor windsnelheids-, windrichtings- en omgevingstemperatuurmeting;
- falen van elk van de metingen door te laag of te hoog afwijkende meetwaarde;
- falen van elk van de metingen door meetdefect waarbij meetwaarde maximum/minimum wordt tot gevolg;
- falen van de windrichtingsmeting door vastzittende windvaan (vorst, mechanisch);
- falen van de windsnelheidsmeting door vastzittend roterende deel (vorst, mechanisch).

hardware in the loop

Het opnemen van hardware in the loop is in eerste instantie eenvoudig te realiseren, omdat de meetsignalen direct naar de PLC's gaan, geen interactie bestaat met ander deelsystemen en er geen stuurcommando's naar dit deelsysteem gaan. De aandrijving van de sensoren vereist echter wel complexe additionele voorzieningen en besturing. De beperkt toegevoegde waarde voor de simulator is echter te gering om dit te rechtvaardigen. Separaat testen van de sensoren is eenvoudiger te realiseren.

4.2.3 Bladverstelsysteem

Voor de simulatie van het bladverstelsysteem zijn vooral de hydraulische en mechanische eigenschappen van belang. T.a.v. de hydraulische voeding van het bladverstelsysteem en van het bijbehorende koelsysteem is weliswaar vereist om te kunnen functioneren, doch de (dynamische) eigenschappen hiervan hebben geen directe interactie met het bladverstelsysteem zelf.

componenten

Binnen dit systeem worden de volgende componenten voor modellering onderscheiden:

- hydraulisch bladverstelmechanisme:
 - niet lineair mechanisme verstelsysteem;
 - lineaire hydrau-motor, hydrau-unit inclusief leidingen en draaidoorvoer;
 - hydraulische accumulatoren;
 - regelunit;
 - verplaatsingsopnemer hydrau-motor;
- bladlager;
- hydraulische pomp met regelbaar slagvolume;
- ventilator/pomp koelsysteem.

interne systeeminteracties

Het bladverstelsysteem bestaat uit de volgende functionele delen waartussen onderlinge interacties plaatsvinden (Figuur 4-2):

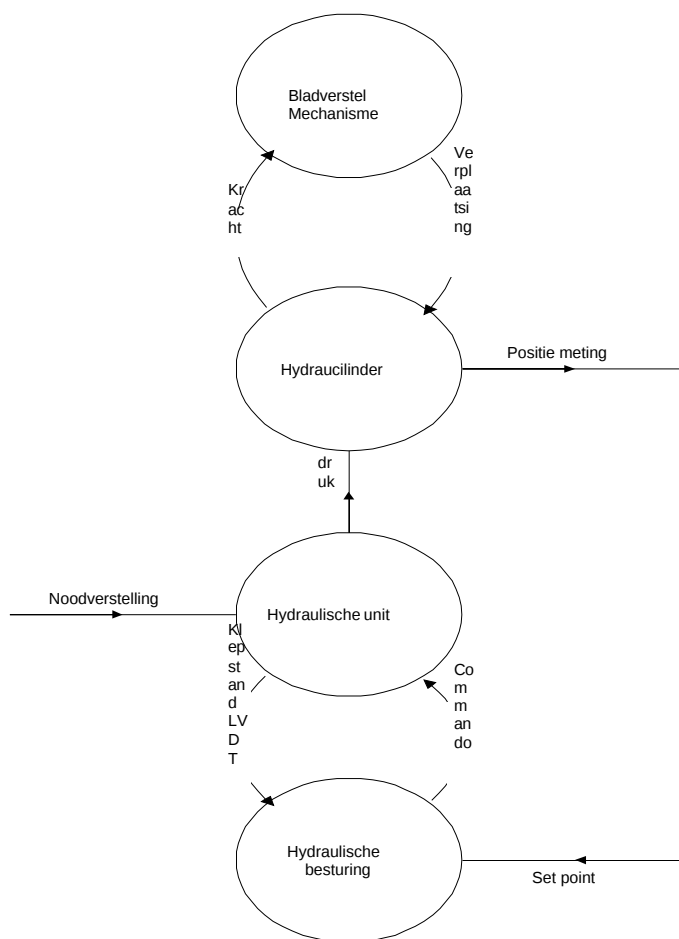
- het pitchmechanisme: dit mechanisme zet de translaterende beweging van de hydraulische motor om in een rotatie van de drie bladen, waarbij de beweging van de bladen onderling mechanisch is vergrendeld;
- de hydraulische cilinder, welke is voorzien van een positieopnemer, de hydraulisch motor is dubbelwerkend;
- de hydraulisch unit, deze bestaat uit een elektrisch aangedreven pomp, koelvoorzieningen, besturingskleppen en een proportionele regelklep en de sturing van dit systeem vindt plaats vanuit het veiligheidssysteem en vanuit de besturingsunit;
- de hydraulische besturing stuurt de regelunit aan op basis van een setpoint en compensatievoorzieningen, de servoverstelling werkt alleen wanneer het veiligheidssysteem niet is afgefallen.

Bij servoverstelling wordt de kracht van de hydrau-motor zodanig geregeld dat de verplaatsing overeenkomt met de gewenste waarde, in geval van noodverstelling wordt de kracht bepaald door de druk in de hydraulische accumulatoren;

externe systeeminteractie

Het bladverstelsysteem heeft interactie met de volgende systemen (Figuur 4-3):

- Voedingssysteem, het bladverstelsysteem heeft een aantal voedingsvoorwaarden:
 - voeding voor aansturing regel- en hydraulische unit;
 - voeding voor koeling van hydraulische unit;
 - voeding voor I/O en pressostaat;
- Bladensysteem, het bladverstelsysteem oefent via de hydraulische cilinder een kracht uit op het bladverstelsysteem, de weerstand wordt bepaald door wrijvingskrachten en aërodynamische krachten;
- Bedienings- en beveiligingssysteem, besturing via de hand unit loopt via de PLC en falen van het bladverstelsysteem zal leiden tot het afschakelen van de installatie.



Figuur 4-2: interne interacties in het bladverstelsysteem van de NW62/3/1000

samenstelling

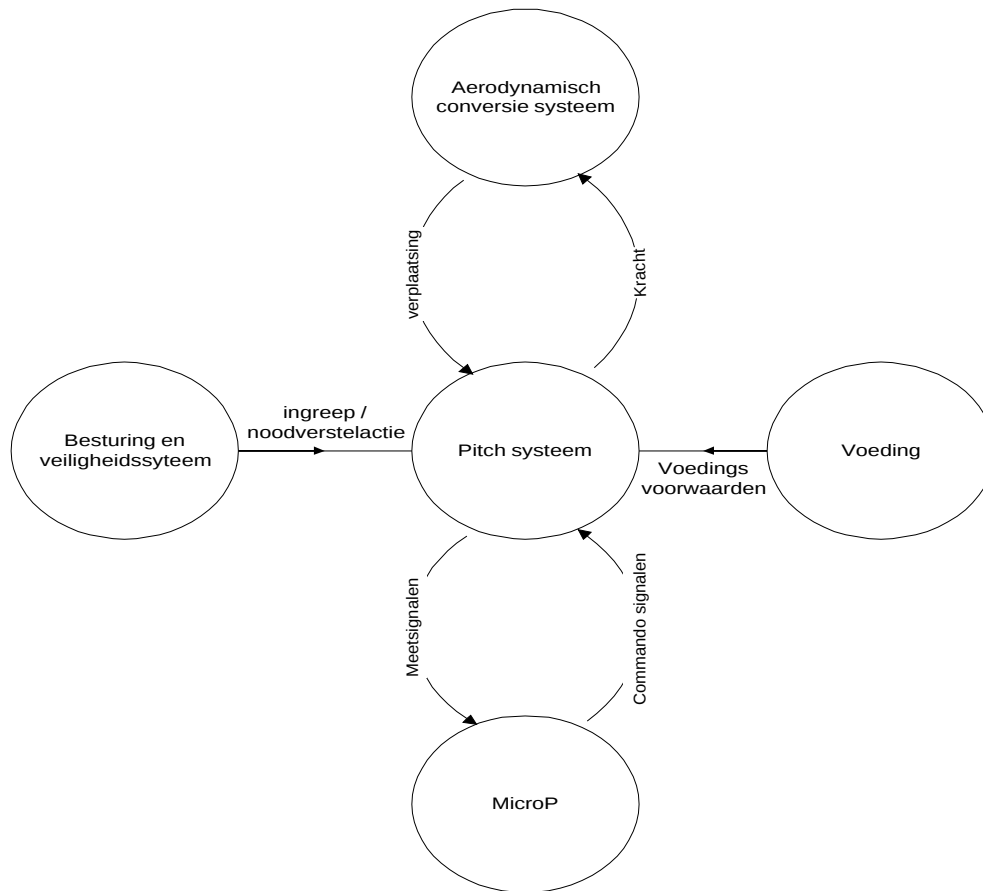
In het bladverstelsysteem worden voor processimulatie de volgende constante eigenschappen onderscheiden:

- aërodynamische eigenschappen bladen t.a.v. bladverstelmomenten (bladbuiging);
- massa traagheid van het blad om pitch-as;
- gegevens die het gedrag van de regelunit bepalen;
- karakteristiek van de accumulator;
- specificaties van het mechanische deel van het bladverstelmechanisme;
- wrijvingscoëfficiënt / Coulombse wrijving / stick slip bladverstellagers;

fenomenen

In het bladverstelsysteem wordt voor processimulatie het volgende continue gedrag onderscheiden:

- viskeuze en droge wrijving lineaire hydrau-motor;
- viskeuze wrijving door bladbuiging in het lager en wrijving in de aandrijving tijdens bladverstelling, en additionele Coulombse wrijving bij richtingsomkering van het blad;
- dynamisch gedrag van de hydraulische bladverstelling (cilinder) inclusief positiemeting op wrijvingskoppels en setpointveranderingen;
- opstart-gedrag van het hydraulica;
- meting generatorvermogen;
- meting generatortoerental;



Figuur 4-3: externe interacties van het bladverstelsysteem van de NW62/3/1000.

events

In het bladverstelsysteem wordt voor processimulatie het volgende discrete gedrag onderscheiden:

- voedingsvoorwaarden voor de diverse systeemcomponenten;
- aanspreken van thermische motorbeveiligingen (hydrau-unit, koelventilator);
- handmatige verstelling/ servoverstelling / noodverstelling;
- uitval van koeling, hydrau-unit;
- verhoogde wrijving bladhoeklager (slijtage, pitting);
- falen van bladverstelmechanisme (blokkering, geen effectuering);
- falen positieopnemer (ontkoppelt van motor);
- onjuiste/geen/maximum waarde van de vermogensmeting;
- onjuiste/geen/maximum waarde van de toerentalmeting;
- olietemperatuur te hoog, hydraulisch filter verstopt;
- olieniveau te laag.

hardware in the loop

Het belang van het bladverstelsysteem alsmede de autonome werking, maakt het bladverstelsysteem aantrekkelijk voor 'hardware in the loop'.

De componenten die hiervoor in aanmerking komen zijn: besturing en installatie, hydraulische voeding en aandrijving en het koelcircuit voor hydraulische olie.

Voor het systeem dient naast elektrische voedingspanning (externe bronnen) een hulpactuator voorhanden te zijn die de hydraulische cilinder van het bladverstelsysteem belast.

Hiervoor kan gedacht worden aan:

- een glijdende massa;
- hydraulische belasting, waarbij via een separaat servo-systeem een berekende bladverstelkracht wordt gerealiseerd;
- het installeren van een bladverstelmechanisme, inclusief bladlagers, waarbij de verstelmomenten via bestuurbare remmen op het bladlager worden gesimuleerd.

Om een goede keuze te kunnen maken m.b.t. het simuleren van de belasting moeten de testdoelen vooraf duidelijk zijn. Wanneer de eis wordt gesteld dat gesimuleerd moet worden met realistisch bladverstelmomenten, dan lopen de kosten al snel op. Het ontwikkelen (en testen daarvan) kost veel tijd en geld. Het testen met een glijdende massa daarentegen kan eenvoudig worden gerealiseerd, terwijl droge wrijving als kritisch fenomeen wel kan worden nagebootst.

4.2.4 Remsysteem

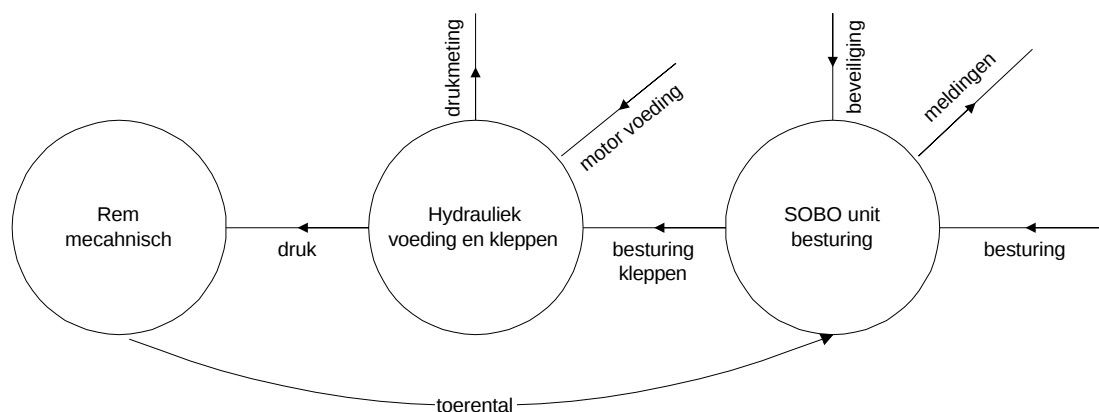
componenten

Binnen dit systeem worden de volgende componenten voor modellering onderscheiden:

- remactuator (rem-controller, tachogenerator, 3 hydraulische kleppen)
- hydraulisch voedingscircuit (motor, pomp, accumulator, prestostaat, restrictie)
- mechanische schijfrem.

interne systeeminteracties

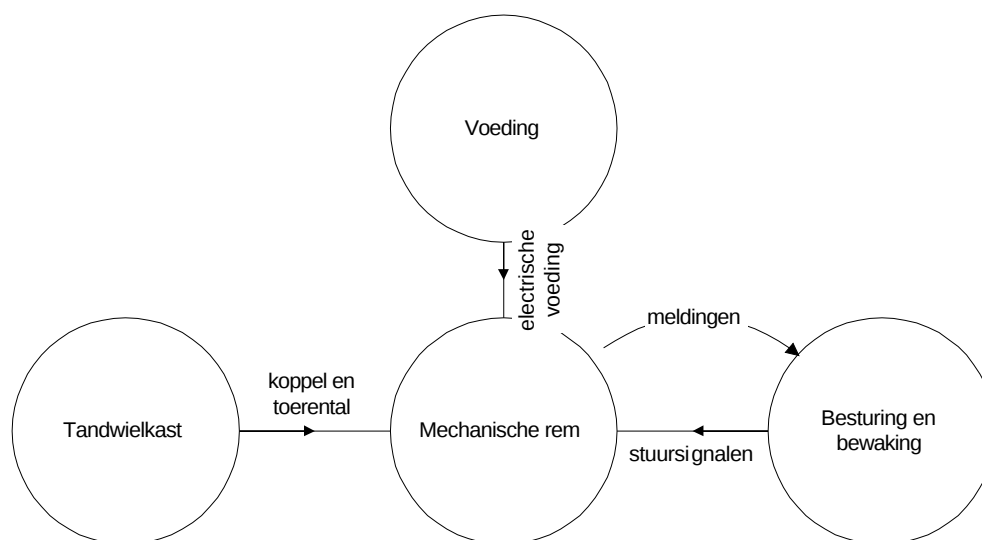
De bediening van de mechanische rem loopt geheel via de rem-controller, ook wanneer het een ingreep van het veiligheidssysteem betreft. De aansturing van de voedingspomp gebeurt echter via de PLC, dus buiten de rem-controller om. Het remsysteem heeft een separate toerentalopnemer.



Figuur 4-4: interne interacties in het remsysteem van de NW62/3/1000.

externe systeeminteracties

De mechanische rem is direct gemonteerd op de snelle as van de tandwielkast. Bediening van de rem vindt plaats via de PLC of via een onderbreking van het veiligheidssysteem. Ook wanneer bediening van de rem plaatsvindt via de hand-unit, lopen de stuurcommando's via de PLC.



Figuur 4-5: externe interacties in het remsysteem van de NW62/3/1000.

Zoals in Figuur 4-5 weergegeven zijn de volgende interacties met andere systemen van toepassing:

- Transmissiesysteem (askoppel, toerental)
- Bedienings- en beveiligingssysteem (noodremacties)
- Voedingssysteem (voedingsvoorwaarden)

samenstelling

In het remsysteem worden de volgende constante eigenschappen onderscheiden:

- rem-controller:
 - logische besturing van de kleppen (inclusief timers) van de kleppen;
 - foutdetecties (incl. voeding) en relevante outputsignalen;
 - specificaties tachogenerator;
- mechanische schijfrem:
 - geometrie remschijf en remklauwen;
 - wrijvings eigenschappen remschijf / pads, droog en viskeus;
 - relatie oliedruk / normaalkracht;
 - karakteristiek van de remveren;
- motor en hydraulische pomp:
 - benodigd pompvermogen als functie van geleverde druk;
 - pomp-debiet als functie van het toerental;
 - koppel / toeren en karakteristiek motor;
- accumulator: relatie olievolume / accumulatordruk;
- kleppen: debiet als functie van de druk;
- restrictie: debiet als functie van de druk;

fenomenen

In het remsysteem wordt voor processimulatie het volgende continue gedrag onderscheiden:

- eenvoudig (quasi stationair) hydraulisch voedingcircuit;
- mechanisch remproces (van hydraulische druk naar een rem koppel op de as);
- drukregeling van de remcilinders (rem-controller).

events

In het remsysteem wordt voor processimulatie het volgende discrete gedrag onderscheiden:

- brake ok signaal niet beschikbaar;
- oliedruk niet in orde;
- thermisch relais motor aangesproken.
- emergency brake / brake system failure / normal brake action / grid outage / de-pressurize / released / reset;
- het blijven hangen van een klep in geval van een noodstopdrie remklauwen worden parallel aangestuurd (remcilinders). Bij normaal remmen, wordt de druk geregeld op basis de toerental afname. De remklauwen kunnen hierdoor onderling gaan afwijken.

hardware in the loop

Omdat het remsysteem een belangrijke rol speelt ten aanzien van veiligheid en het systeem in hoge mate autonoom werkt is het opnemen van dit systeem als 'hardware in the loop' gewenst.

De hoge askoppels (door aandrijvende hulpactuator) die vereist zijn als het gehele systeem buiten de simulator om zou worden opgesteld, wegen niet op tegen de baten van een dergelijk opstelling. Alleen de rem-controller als 'hardware in the loop' is wel een mogelijkheid, het gemeten toerental is beschikbaar in de processimulator. Na modelaanpassingen kunnen dan de uitgangssignalen van de rem-controller weer verder verwerkt worden in de processimulatie.

Uitbreiding met de hydraulische unit en remklauwen is haalbaar, mits de ontwikkelde remkracht (druk) gemeten wordt (door een hulpactuator) om binnen de processimulatie gebruikt te worden. Deze laatste uitbreiding verhoogt de complexiteit van de opstelling in hoge mate.

4.2.5 Elektrisch conversiesysteem

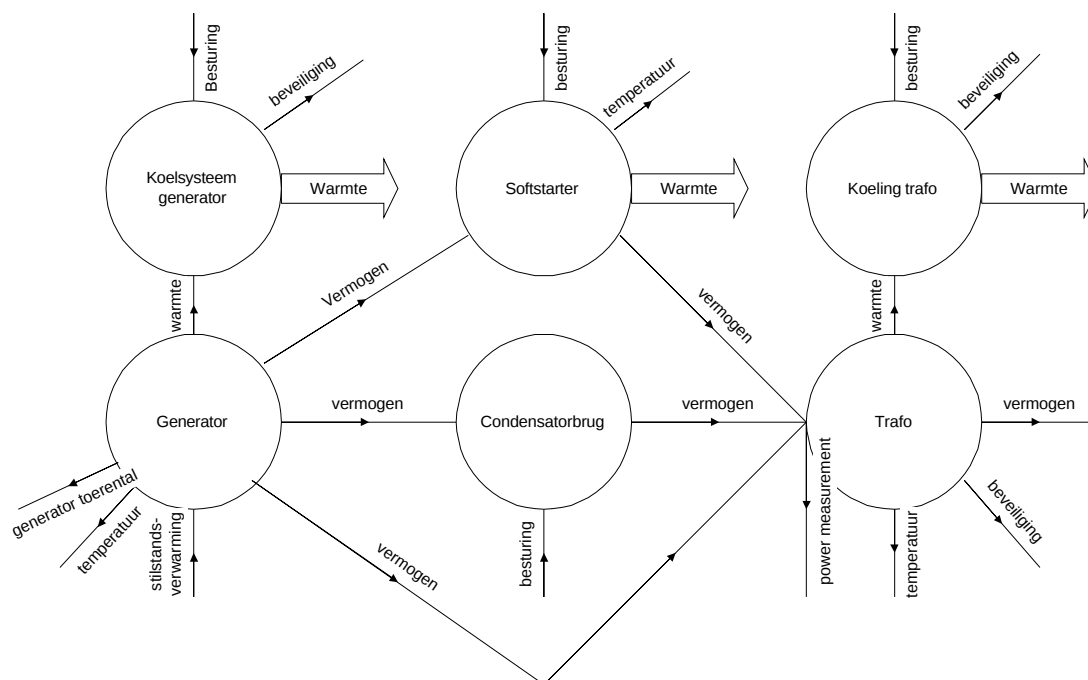
componenten

Binnen het elektrisch conversiesysteem worden de volgende componenten voor modellering onderscheiden:

- generator, inclusief koelsysteem en verwarming;
- softstarter met bypassschakelaars;
- condensatoren;
- transformator en bijbehorend koelcircuit;
- temperatuurmetingen generatorwikkeling, generatorlager, transformator en softstarter;
- vermogensmeting.

interne systeeminteracties

Het elektrische systeem kan worden opgedeeld in de functionele eenheden zoals in onderstaande Figuur 4-6 is aangegeven. Zowel de generator als de transformator hebben een eigen koelcircuit. De warmte van de softstarter wordt via een koelelement afgevoerd.

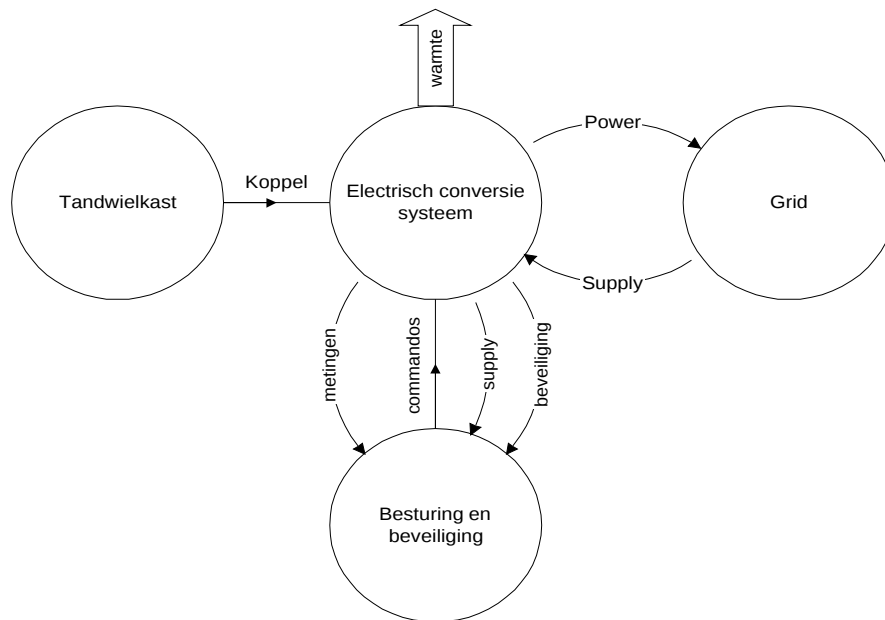


Figuur 4-6: interne interacties in het elektrisch conversiesysteem van de NW62/3/1000.

externe systeeminteracties

Externe interacties van het elektrisch conversiesysteem worden aangegeven in Figuur 4-7.

De 10 kV transformator voorziet de systemen in de turbine van voeding en wordt ook gebruikt voor de netkoppeling. De besturing van de installatie vindt plaats vanuit het elektrische systeem.



Figuur 4-7: externe interacties in het elektrisch conversiesysteem van de NW62/3/1000.

Er de volgende interacties met andere systemen:

- Transmissiesysteem (askoppel, toerental aan de snelle zijde);
- Bladverstelsysteem (gemeten generatorsnelheid);
- Elektriciteitsnet (netspanning, netfrequentie);
- Bedienings- en beveiligingsysteem (in/uitschakelen netkoppeling);
- Toren- en fundatiesysteem (zijwaartse torentopbewegingen op elektrisch koppel);
- Voedingssysteem (voedingsvoorwaarden).

samenstelling

In het elektrisch conversiesysteem worden voor processimulatie de volgende constante eigenschappen onderscheiden:

- generator:
 - generatormassa en massatraagheidsmoment;
 - koppel-toerental karakteristiek;
 - nominale elektrische gegevens en eigenschappen;
 - elektrische, mechanische verliezen;
 - thermische eigenschappen (wikkeling, lager);
 - koelcapaciteit van de generatorkoeling;
- softstarter:
 - nominale elektrische gegevens en eigenschappen;
 - gedragsparameters, instelmogelijkheden (ramp function);
 - elektrische verliezen;
 - thermische eigenschappen;
- condensatoren:
 - nominale gegevens (capaciteit, spanning);
 - elektrische verliezen;
- transformator:
 - nominale elektrische gegevens en eigenschappen;
 - elektrische verliezen;
 - thermische eigenschappen en koeling;
 - karakteristieke parameters voor overbelastingsbeveiliging (I_{xt});
- temperatuurmetingen: stabiliseringstijdconstante;

fenomenen

In het elektrisch conversiesysteem wordt voor processimulatie het volgende continue gedrag onderscheiden:

- dynamische modellering asynchrone generator die via softstarter aan netgekoppeld is:
 - inschakelverschijnselen generator via softstarter;
 - overgang naar bypass softstarter;
 - faalgedrag generator (kortsluiting / gridfailure);
 - motorbedrijf generator;
- in- en uitschakelverschijnselen condensatoren;
- thermisch gedrag van generator in samenhang met de koeling en verwarming;
- thermisch gedrag van de softstarter in samenhang met bypassing;
- thermisch gedrag van de transformator in samenhang met koeling;
- wisselwerking tussen zijwaartse torentopbewegingen en elektrische koppelvariaties;
- temperatuursgedrag van het generatorlager;
- gedrag van temperatuurmetingen.

events

In het elektrisch conversiesysteem wordt voor processimulatie het volgende discrete gedrag onderscheiden:

- te hoge / afwijkende /ontbrekende temperatuur van transformator, generatorwikkeling, generatorlager, softstarter;
- koelcircuits (thermisch) overbelast (generator, transformator3x);
- voedingsvoorwaarden voor diverse componenten;
- faalmelding transformator, softstarter;
- opstarten / vrijloop / netkoppeling / bedrijf laag toerental / bedrijf hoog toerental;
- falen van de toerentalopnemer.

hardware in the loop

Hardware in the loop vormt hier geen serieuze mogelijkheid. De grootte van stromen, koppels maar ook de omvang van de componenten en hulp actuatoren zijn moeilijk te realiseren. Om een realistische simulatie uit te voeren moet de generator een hoog vermogen kunnen leveren waarvoor veel speciale voorzieningen vereist zijn.

4.2.6 Transmissiesysteem

De wijze waarop de tandwielkast in de simulatie wordt opgenomen is sterk afhankelijk van het doel. Wanneer het gaat om het testen van controllers volgens de huidige state-of-the-art, dan kan een eenvoudig model voldoen. Wanneer aan meer gedetailleerdere toepassingen wordt gedacht, (trillingscompensatie), dan zal hiermee ook de complexiteit van het model toenemen.

componenten

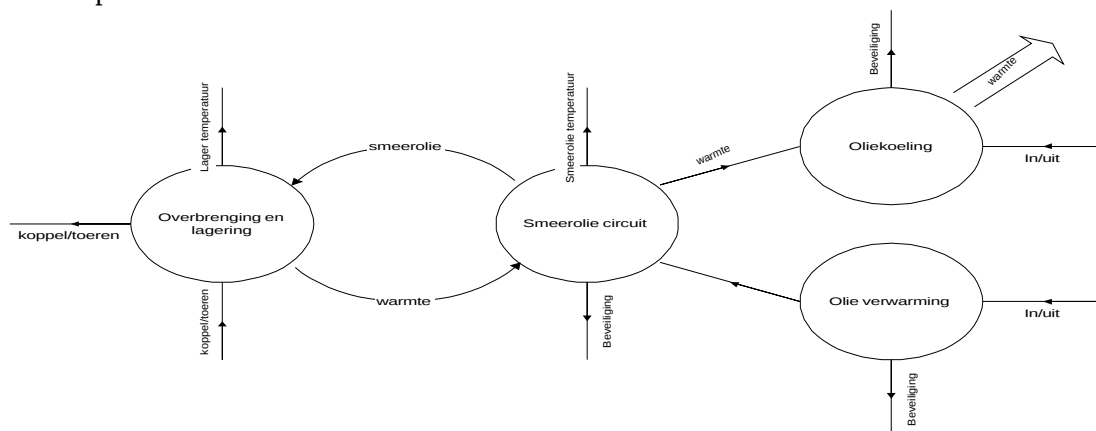
Binnen het transmissiesysteem worden de volgende componenten onderscheiden:

- tandwielkast;
- hoofdaslager;
- oliecircuït (koeling, verwarming, circulatie).

interne systeeminteracties

Binnen de tandwielkast kunnen de volgende functies worden onderscheiden (Figuur 4-8):

- de overbrenging van het aërodynamisch koppel van de rotoras naar de generator;
- het ondersteunen van de hoofdas; de temperatuur van het hoofdaslager wordt bewaakt;
- het smeeroeliecircuït voor de smering en koeling van de tandwielkast; de temperatuur van de olie wordt gemeten; de stand van de handbediende klep wordt gemeld aan de besturing;
- het koelcircuit voor het afvoeren van de warmte naar de omgeving, de ventilator wordt in- en uitgeschakeld op basis van de gemeten temperatuur;
- de tandwielkastverwarming, ook deze wordt in- en uitgeschakeld op basis van de gemeten temperatuur.

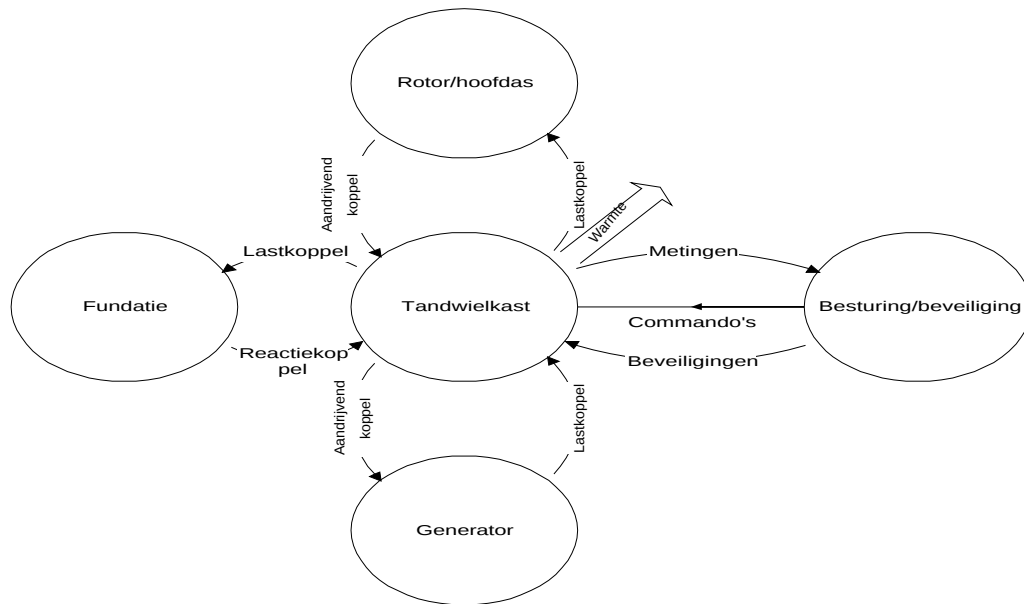


Figuur 4-8: interne interacties in het transmissiesysteem van de NW62/3/1000.

externe systeeminteracties

De tandwielkast wordt met een hoog koppel/laag toerental aangedreven door de rotor en drijft vervolgens de generator aan met een laag koppel/hoog toerental. Dit heeft een koppel op de fundatie (gondel) tot gevolg.

Falen van het olie smeer- en koelcircuit, alsmede een te hoge lagertemperatuur zal leiden tot het afschakelen van de installatie.



Figuur 4-9: externe interacties in het transmissiesysteem van de NW62/3/1000.

Het transmissiesysteem bevat de volgende interacties met andere systemen:

- Bladensysteem (bladzwaaitrillingen, aërodynamisch koppel);
- Remsysteem (massatraagheid, ingrijpen rem);
- Elektrisch conversiesysteem (generatormassatraagheid, generatorkoppel);
- Toren- en fundatiesysteem (koppeling tweede torenbuigmode zijwaarts);
- Voedingssysteem (voeding oliecircuït).

samenstelling

In het transmissiesysteem worden voor processimulatie de volgende constante eigenschappen onderscheiden:

- massatraagheidsmomenten generator, rotor, rem, tandwielkast;
- overbrengingsgegevens van de tandwielkast;
- ophanging van tandwielkasthuis aan gondel;
- torsiestijfheid rotoras, generatoras;
- dempingseigenschappen van de aandrijftrein (koppelingen);
- thermische eigenschappen tandwielkast (warmteafgifte);
- rendementsgegevens en verliezen;
- koelcapaciteit oliekoelcircuit;
- verwarmingscapaciteit olieverwarmingscircuit (vermogen).

fenomenen

In het transmissiesysteem wordt voor processimulatie het volgende continue gedrag onderscheiden:

- dynamische versnelling van de hoofdas door versnellend koppel (rotatievergelijking);
- dynamisch model voor samengestelde trillingen in flexibele aandrijftrein; eenvoudige benadering kan bestaan uit massa-veer equivalent (eerste eigentorsiemode), een hoger orde model kan invloeden bevatten, zoals:
 - bladzwaaitrillingen (tweede asymmetrische mode);
 - flexibele tandwielkastophanging (aan gondel);
 - koppeling met de tweede zijwaartse toreneigenfrequentie (rotatie tandwielkasthuis);
- optredende transmissieverliezen en afhankelijkheid van toerental, koppel;
- thermisch gedrag hoofdaslager aan de tandwielkastzijde (opwarming);
- thermisch gedrag van de smeerolie afhankelijk van oliestroom en temperatuur (opwarming, warmteafgifte aan koelcircuit, warmteopname van verwarmingscircuit).

events

In het transmissiesysteem wordt voor processimulatie het volgende discrete gedrag onderscheiden:

- voedingsvoorwaarde (metingen, koelcircuit, verwarmingscircuit, oliepomp);
- temperatuur smeerolie te hoog/laag;
- temperatuur lager te hoog;
- gemeten temperatuur lager/smeerolie is afwijkend/te hoog/niet aanwezig;
- druk smeeroliesysteem te laag;
- vervuiling oliefilter, drukverschil over oliefilter te hoog;
- ontbreken oliestroom (pomp faalt, afsluiter gesloten);
- koeling bij hoog/laag toerental bedrijf.

hardware in the loop

Gezien de gering toegevoegde waarde en de enorme complexiteit, biedt dit systeem geen mogelijkheden voor 'hardware in the loop'.

4.2.7 Toren- en fundatiesysteem

componenten

Binnen dit systeem worden de volgende componenten voor modellering onderscheiden:

- toren;
- fundatie;
- versnellingsopnemer in x- en y-richting.

interne systeeminteracties

- torentopuitwijking, -snelheid, -versnelling;
- buigmoment torenvoet;
- gondelversnelling in x-richting;
- gondelversnelling in y-richting;
- onbalans grenswaarde-overschrijding.

externe systeeminteracties

- Krui- en retwistsysteem (tiltkoppels);
- Bladensysteem (axiaalkracht, bladklapbewegingen);
- Elektrisch conversiesysteem (generatorkoppelreactie);
- Transmissiesysteem (astorsiekoppeling met tweede torenbuigmode);
- Golven (torentopeffectieve golfkrachten);
- Grond (fundatiestijfheid);
- Voedingssysteem(voedingsvoorwaarden).

samenstelling

In het toren- en fundatiesysteem worden voor processimulatie de volgende constante eigenschappen onderscheiden:

- torenmassa;
- torentopmassa (totale gondelmasa incl. rotor);
- tilthoek;
- toreneigenfrequentie, -stijfheid, -structurele demping;
- fundatiestijfheid;
- specificaties van de versnellingssensoren.

fenomenen

In het toren- en fundatiesysteem wordt voor processimulatie het volgende continue gedrag onderscheiden (massa-veer-demper)⁴:

- Eerste buigmode torendynamica:
De eerste zijwaartse en voor-/achterwaartse buigmode van de toren kunnen als een massa-veer-equivalent axi-symmetrisch worden gemodelleerd. De belastingsinvloeden worden dan vertaald naar zogenaamde torentop equivalente krachten.
De torenbuiging in zijwaartse richting wordt veroorzaakt door elektrische koppelvariaties die reacties op de torentop uitoefenen (4.2.5). De torenbuiging in voor-/achterwaartse richting wordt veroorzaakt door de axiaalkracht (4.2.1). De uitwijking van de toren in deze richting kan verdisconteerd worden in de windsnelheid die de rotor ondervindt (5.1). De demping in voor-/achterwaartse richting wordt vergroot door de dempende werking van de rotor (aërodynamische demping). Verder ondervindt de torentop de gevolgen van hydrodynamische golfkrachten tegen de voet van de toren, dit kan afhankelijk van de aanstroombuik zowel in voor-/achterwaartse richting en/of in zijwaartse richting zijn (torentopeffectieve golfkrachten, 5.2).

⁴ Als hogere buigvormen beschreven dienen te worden voldoet deze benadering niet meer, er dient dan een ingewikkelder zogeheten lumped parameter model (LPM) te worden gehanteerd.

Onderstaande betrekkingen beschrijven de torendynamica volgens de voorgestelde benadering:

$$m_t \cdot \ddot{x}_{nd} + k_t \cdot \dot{x}_{nd} + c_t \cdot x_{nd} = F_{nd}^{topeqv}$$

$$m_t \cdot \ddot{x}_{ny} + k_t \cdot \dot{x}_{ny} + c_t \cdot x_{ny} = F_{ny}^{topeqv}$$

De vergelijkingen worden gedimensioneerd door de torentopeffectieve massa, en equivalente stijfheid en demping. De dynamica wordt in beide richtingen geëxciteerd door een samenstel van torentop equivalente krachten. De aanwezigheid van de tandwielkast veroorzaakt een reactiekoppel op het gondelframe.

- Torsie vervorming van de toren:
Iedere kruibeweging van de gondel veroorzaakt een reactiekoppel dat ten aanzien van de toren in torsie vervorming resulteert. Voor een buistoren (zoals de NW62/3/1000) is dit effect vanwege de hoge torsiestijfheid verwaarloosbaar. Het veronderstellen van een oneindig hoge torsiestijfheid zal derhalve gerechtvaardigd blijken.
- Kruimomenten:
Door kruien ontstaat als gevolg van de gyroscopische werking een tilt koppel dat de toren in voor-/achterwaartse beweging belast met een torentop-effectieve kracht ter grootte $\frac{3}{2}T_{\text{tilt}}/Z_t$. Deze extra kracht die de torentop ondervindt, benadrukt de interactie tussen kruien en torenbewegingen. Ook de door bladbreuk/bladverlies tot stand gekomen kruimomenten krijgen hierdoor dus invloed op de bewegingen van de toren(top).
- Fundatiegedrag:
Ten aanzien van de fundatie wordt enkel een variatie in stijfheid onderkend (zie 5.3). Dynamisch gedrag zoals (ingeval van offshore) zandophoping e.d. worden vooralsnog buiten beschouwing gelaten.

Verder worden ten aanzien van onbalans nog als fenomenen onderkend:

- dynamisch gedrag van de versnellingsmeting voor/achterwaarts (delay, meetruis)
- dynamisch gedrag van de versnellingsmeting zijwaarts (delay, meetruis)

events

In het toren- en fundatiesysteem wordt voor processimulatie het volgende discrete gedrag onderscheiden:

- creëren van een toren(top)excitatie door (onbepaalde) externe invloed;
- voedingsvoorwaarde voor versnellingsmetingen;
- aanspreken onbalansalarm (PLC);
- falen van de (afzonderlijke) metingen door te laag/te hoog afwijkende of niet variërende meetwaarde;
- falen van de (afzonderlijke) metingen door meetdefect waarbij meetwaarde max/min wordt.

hardware in the loop

Als het toren- en fundatiesysteem als 'hardware in the loop' zou worden opgenomen, dan zou hier slechts de onbalansdetectie voor in aanmerking komen. Hiertoe is dan een hulpsysteem vereist dat de gondeltrillingen en bewegingen onder momentane (simulatie) omstandigheden ten behoeve van de versnellingsopnemers realiseert. Deze complexiteit weegt geenszins op tegen de beperkt toegevoegde waarde van deze 'hardware in the loop'. Het opnemen van onbalansdetectie als 'hardware in the loop' is derhalve geen optie.

4.2.8 Krui- en retwistsysteem

Het krui-systeem ondervindt hoge belastingen. Om de krui aandrijving te ontlasten zijn daarom zowel passieve als actieve remmen in het krui-systeem opgenomen. De passieve remmen hebben tot doel de dynamische belasting op de kruimotoren te verminderen. Door de slechte smeercondities van het krui lager zijn de remeigenschappen moeilijk voorspelbaar. Dit kan stick-slip effecten tot gevolg hebben.

De vier krui aandrijvingen zijn via de tandkrans mechanisch gekoppeld. Het is daarom van belang dat de koppel-toeren karakteristieken van de motoren gelijk zijn en dat de aansturing simultaan verloopt. Afwijking leidt tot ongelijke belasting van de motoren. Het is van belang deze eigenschappen in de simulatie mee te nemen.

componenten

Binnen het krui- en retwistsysteem worden de volgende componenten voor modellering onderscheiden:

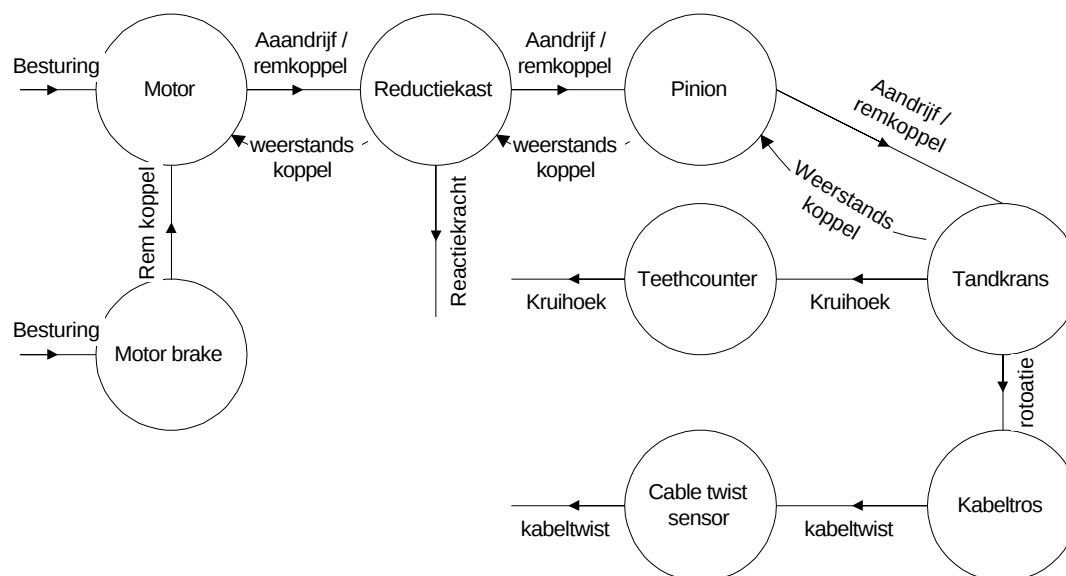
- direct ingeschakelde asynchrone motoren met reductiekasten, remmen en mechanische onderlinge vergrendeling van 4 units;
- thermische motorbeveiliging;
- stroombeveiligingen;
- krui lager;
- krui baanremmen;
- inductieve positieopnemers;
- kabeltwistmeting.

interne systeeminteracties

De krui aandrijving (Figuur 4-10) bestaat uit 4 identieke units, bestaande uit een rem, een asynchrone motor, een reductiekast en een aandrijf wiel. Deze aandrijf units zijn gemonteerd aan de gondelzijde van het krui lager. De vier units drijven een gemeenschappelijke tandkrans aan. De kruihoek wordt gemeten door de tanden te tellen. Ten behoeve van deze relatieve meting wordt ook een nulpunt gemeten.

Naast de kruihoek is de kabeltwist van belang. Deze wordt bewaakt via een kabeltwist-schakelaar.

De kruihoek wordt geregeld op basis van de gemeten gierhoek. Deze is als continu signaal beschikbaar vanuit het meteo-systeem (4.2.2).



Figuur 4-10: interne interacties in het krui- en retwistsysteem van de NW62/3/1000.

externe systeeminteracties

De volgende interacties met andere deelsystemen zijn van belang:

- Toren- en fundatiesysteem (torentorsie);
- Meteosysteem (windrichtingsmeting);
- Bladensysteem (axiaalkracht);

samenstelling

In het krui- en retwistsysteem worden voor processimulatie de volgende constante eigenschappen onderscheiden:

- massa's van roterende delen (kruimotoren, reductiekasten, gondel inclusief rotor);
- geometrie rotor (inclusief tilt/cone hoek);
- aërodynamische thrust eigenschappen rotor;
- parameters voor het vaststellen van het aandrijvend koppel (koppel-toerenkromme);
- karakteristiek parameters voor overbelastingsbeveiliging (Ixt);
- wrijvingscoëfficiënt / coulombse wrijving / stick-slip kruilager;
- wrijvingscoëfficiënt / coulombse wrijving / stick-slip kruibaanremmen;
- signaal karakteristiek inductieve opnemers en markeringen (boutkoppen en nul-positie);
- eigenschappen kabeltros bij torsie (relatie torsie versus lift);
- luchtdichtheid.

fenomenen

In het krui- en retwistsysteem wordt voor processimulatie het volgende continue gedrag onderscheiden:

- dynamisch model voor het (aanloop-) koppel en stroomgedrag van de kruimotoren;
- dynamica belastingskoppel (wrijvingsgedrag) door kruilager, transmissie en passieve kruirem (inclusief coriolis-effecten);
- onderlinge vergrendelingen in installatie: kruiremmen versus verstelling, CW versus CCW;
- door stochastische windrichtings- en windsnelheidsveranderingen veroorzaakte aëro-dynamisch kruikoppel;
- gedrag van de kruimotorremmen (delay);
- dynamische gedrag kabeltwistmeting (relatie torsie versus lift);
- stroommeting kruimotoren (één fase);

events

In het krui- en retwistsysteem wordt voor processimulatie het volgende discrete gedrag onderscheiden:

- thermische beveiligingen van de kruimotoren;
- vermogensbewaking van kruiaandrijving;
- voedingsvoorwaarden voor de kruimotoren en de hulpapparatuur;
- automatisch lichten van kruiremmen en CW/CCW inschakelen van kruimotoren uit het besturingssysteem;
- handmatig inschakelen CW/CCW kruien;
- een of meerder kruimotorremmen worden niet gelicht;
- afwijkende/te hoge/ontbrekende waarde van de positieteller;
- maximale kabeltwist bereikt;
- onderlinge verschillen in inschakeltijdstippen van de kruiaandrijvingen.

hardware in the loop

Het hardwarematig opnemen van één of meerdere krui-aandrijvingen, inclusief hoofdstroom, schakel en beveiligingsinrichting is mogelijk. Voor een realistische simulatie vereist dit extra hardware in de vorm van het aanbrengen van een belasting op de krui-units. Het mechanisch koppelen van de kruimotoren is mogelijk door de assen onderling te koppelen (twee aseinden). De thermische beveiligingen kunnen nu rechtstreeks van de motoren naar de PLC.

Voor de twistmeting is er als 'hardware in the loop' ook een mogelijkheid. Als dit in combinatie is met een kruimotoren, dan moet worden voorzien in een extra benodigde overbrenging van kruimotortoerental naar twistensor-rotatie (hulpactuator). Zonder kruimotor dient de simulator een representatief toerental uit te geven t.b.v. een extra benodigde twistensoraandrijving (bijvoorbeeld een dc-motortje als hulpactuator). De laatste optie beschikt over weinig toegevoegde waarde.

4.2.9 Bedienings- en beveiligingssysteem

componenten

Binnen het bedienings- en beveiligingssysteem worden de volgende componenten voor modellering onderscheiden:

- de componenten zoals in het bladverstelsysteem (4.2.3) zijn opgenomen bij noodverstelling;
- de componenten zoals die in het remsysteem (4.2.4) zijn opgenomen voor noodremactie;
- noodstopknoppen;
- hydraulische, elektrisch geschakelde klep.

interne systeeminteracties

- drie-standen schakelaar zorgt voor eenduidige bediening;
- de hand-unit kan worden gebruikt voor het bedienen van de mechanische rem, het pitchsysteem en het kruisysteem; wanneer de hand-unit is aangesloten, wordt de automatische bedrijfsvoering geblokkeerd, dit is in de besturingsprogrammatuur geregeld.
- bij zes deelsystemen is een noodstopknop aangebracht, elk van deze noodstopknoppen onderbreekt het veiligheidscircuit;
- het besturingssysteem onderbreekt het veiligheidscircuit via een relais.

externe systeeminteracties

De volgende interacties met andere deelsystemen zijn van belang (Figuur 4-11):

- Bladverstelsysteem (noodverstelling van de bladen);
- Remsysteem (noodremactie);
- Voedingssysteem (voeding veiligheidscircuit);
- Transmissiesysteem (ingrijpen van de rem).

samenstelling

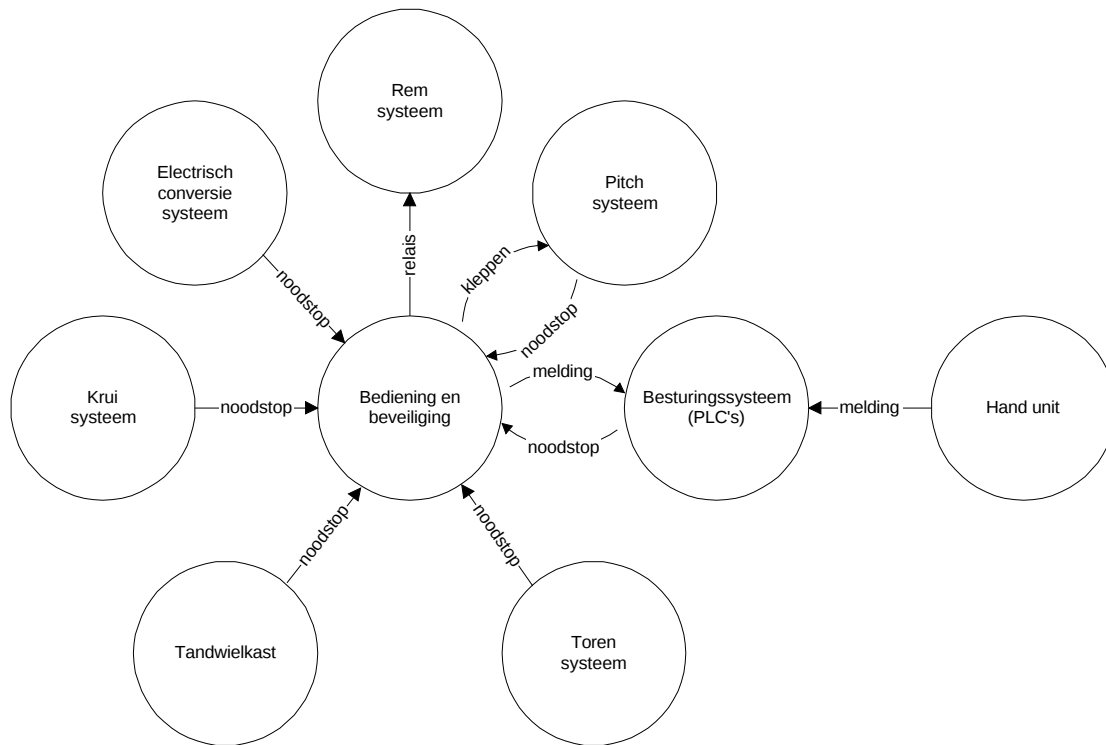
In het bedienings- en beveiligingssysteem worden voor processimulatie de volgende constante eigenschappen onderscheiden:

- eigenschappen van het bladverstelsysteem bij noodverstelling (4.2.3);
- eigenschappen van mechanische rem bij noodremactie(4.2.4);
- schakeltijd hydraulische klep.

fenomenen

In het bedienings- en beveiligingssysteem wordt voor processimulatie wordt geen relevant continu gedrag onderkend:

- fenomenen van het bladverstelsysteem bij noodverstelling (4.2.3);
- fenomenen van mechanische rem bij noodremactie(4.2.4).



Figuur 4-11: externe interacties in het bedienings- en beveiligingssysteem van de NW62/3/1000.

events

In het bedienings- en beveiligingssysteem wordt voor processimulatie het volgende discrete gedrag onderscheiden:

- falen van het bladverstelsysteem bij noodverstelling (4.2.3);
- falen mechanische rem bij noodremactie(4.2.4);
- onderbreking van voedingveiligheidscircuit door noodstopbediening;
- voedingsvoorwaarde (aanwezigheid voedingsspanning);
- veiligheidscircuit gesloten (turbine operationeel onder beheer PLC);
- veiligheidscircuit onderbroken door PLC (turbine blijft onder beheer PLC).

hardware in the loop

Het bedienings- en beveiligingssysteem biedt geen perspectieven voor 'hardware in the loop'.

4.2.10 Voedingssysteem

Het voedingssysteem is complex en leidt tot een set van voedingsvoorwaarden voor alle componenten in de diverse systemen. Deze kunnen waarschijnlijk het meest efficiënt via logische vergelijkingen in het model worden verwerkt.

componenten

Binnen het voedingssysteem worden de volgende componenten voor modellering onderscheiden:

- zekeringen en beveiligingen;
- gelijkrichter;
- transformatoren;
- UPS;
- schakelaars.

interne systeeminteracties

Het voedingssysteem bestaat uit 5 voorzieningen, welke in de gehele installatie voorwaardelijk beschikbaar zijn :

- 690 Vac, deze spanning wordt rechtstreeks afgeleid van de trafo;
- 400 Vac, deze spanning wordt ook rechtstreeks afgeleid van de trafo, via separate wikkelingen;
- 230 Vac, deze spanning wordt afgeleid van de 400 VAC; er worden twee verschillende fasen gebruikt;
- 230VacNB, deze spanning is beschikbaar wanneer de UPS operationeel is; uiteraard geldt dit voor een beperkte periode. Voor simulatiedoeleinden is deze tijd van geen belang. voorwaarde voor beschikbaarheid ervan;
- 24 Vdc algemeen, deze spanning wordt afgeleid van de UPS;

Naast de centrale 24 Vdc zijn er op een aantal plaatsen lokale 24 Vdc voorzieningen, welke van de 230 Vac en 230VacNB worden afgeleid:

- supply heating windsensors
- Tower Base (230VacNB);
- rem-controller (230 VacNB);
- aansturing van de regelunit van het bladverstelsysteem.

externe systeeminteracties

1	meteo	24 Vdc alg.	voeding sensoren en signaalconversie
		24 Vdc heat	verwarming windsnelheidsmeting, windrichtingsmeting
2	pitch	690 Vac	motor hydraulica
		400 Vac	ventilator motor oliekoeler hydraulica
		24 Vdc regelunit	sturing regel-unit en kleppen
3	tandwielkast	690 Vac	ventilator motor oliekoeler tandwielkast oliepompmotor tandwielkast olieverwarming tandwielkast
4	elektrisch conversie systeem	690 Vac	vermogensopwekking (generator, softstarter, condensatoren) ventilatormotor generator
		400 Vac	Softstarter
		230 Vac	verwarming generator transformator safeguarding
		230 VacNB	Vermogensmeting
		230 Vac	ventilatormotor transformator
5	rem systeem	230 Vac	motor voor hydraulische rem
		24 Vdc rem	rem controller
6	krui- en retwist systeem	690 Vac	krui motoren krui remmen
		230 Vac	krui vermogen safeguarding
7	veiligheidssysteem	230 VacNB	Veiligheidscircuit

samenstelling

In het voedingssysteem worden voor processimulatie de volgende constante eigenschappen onderscheiden:

- karakteristieke parameters (Ixt-gedrag) van een overstroom/overbelastingsbeveiliging;
- parameters voor transformatormodel (primaire/secundaire weerstand, lekinductiviteit, hoofdinductiviteit, wikkelingverhouding, nominale gegevens);
- UPS karakteristiek (spanning/stroom).

fenomenen

In het voedingssysteem wordt voor processimulatie het volgende continue gedrag onderscheiden:

- de invloed van een lagere voedingsspanning op het gedrag van systemen of componenten, die gevoed worden door een niet gestabiliseerde voedingsspanning (bijvoorbeeld door uitschakelen na het passeren van een bepaalde drempelwaarde);
- quasi-stationair gedrag van een drie fasen transformator t.b.v. componenten of systemen in hoofdstroomketens die direct gevoed worden (kruimotoren, hydrau-motor);
- het Ixt gedrag van een beveiligingsschakelaar t.b.v. componenten of systemen in hoofdstroomketens die direct gevoed worden (overbelasting b.v. kruimotoren).

events

In het voedingssysteem wordt voor processimulatie het volgende discrete gedrag onderscheiden:

- aanspreken van iedere willekeurige beveiligingsschakelaar (effectuering via voedingsvoorwaarde);
- uitvallen van één, twee willekeurige voedingsfase(n);
- uitvallen van een driefasenvoeding (hoofdschakelaar, breuk, sleepkring);
- het wegvallen (veiligheid, gelijkrichter) van een stuurspanning (24Vdc circuit);
- uitval van een transformator.

hardware in the loop

Het voedingssysteem is niet relevant voor opname als 'hardware in the loop'.

5. MEDIA-ANALYSE

In deze media-analyse worden de processimulatie aspecten voor de media: wind, golven, grond en elektriciteitsnet gedefinieerd. Media als regen(slag), atmosferische ontladingen worden vooralsnog buiten beschouwing gelaten.

5.1 Wind

Het medium wind is een continue stochastische grootheid die beschreven wordt door spectrale eigenschappen (Kaimal spectrum). Voor een beschrijving van wind is het voor processimulatie van belang om de interactie met de rotor te beschouwen en bestaande IEC richtlijnen te volgen. Er wordt onderscheidt gemaakt in twee mediumcomponenten: *windsnelheid* en *windrichting*.

5.1.1 Windsnelheid

samenstelling

Voor windsnelheid worden voor processimulatie de volgende constante eigenschappen onderscheiden:

- IEC windklasse;
- turbulentie intensiteit;
- parameters voor Kaimalspectrum van de longitudinale windsnelheidscomponent;
- parameters voor exponentiele coherentiefunctie;
- naafhoogte (rotorcentrum);
- shearfactor (terreinafhankelijk);
- tilthoek; conehoek;
- bladstraal;
- aantal bladen;
- afstand tussen toren en naaf;
- nominale rotorsnelheid.

fenomenen

Voor windsnelheid wordt voor processimulatie het volgende continu gedrag onderscheiden:

- rotoffectieve windsnelheid;
- bladeffectieve windsnelheid;
- windsnelheid in een vast punt.

Deze beoogde benadering om deze fenomenen binnen de processimulator te gebruiken zal hierna toegelicht worden.

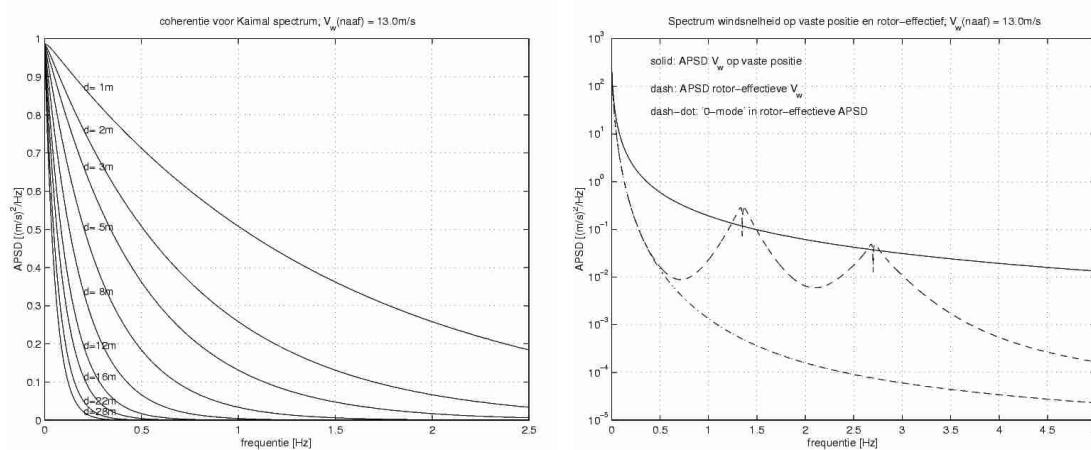
Rotoreffectieve windsnelheid:

Rotoreffectieve windsnelheid is noodzakelijk om (snelle) processimulaties mogelijk te maken waarbij alleen rotorbrede effecten relevant zijn (rotor-axiaalkracht en aërodynamisch koppel).

Rotoreffectieve windsnelheid wordt gedefinieerd als een éénpunts windsnelheidssignaal, dat via de vermogens- en axiaalkrachtcoëfficiënt van een zekere turbinerotor, een rotor-asbelasting teweegbrengt die stochastisch equivalent is (op een starre rotor) aan een met blad element theorie (BEM) berekende belasting in een turbulent windveld. Ook bijkomende effecten zoals windschering (windshear) en torenpassage (towershadow) worden hierin verdisconteerd.

Een *rotoeffectief turbulentiesignaal* wordt onder bepaalde condities afgeleid vanuit de vermogensspectrum dichtheidsfunctie (APSD) voor longitudinale windsnelheidsvariaties ter plekke van het rotorcentrum en de laterale coherentie over het rotoroppervlak.

Conform de IEC61400-1 standaard [A3] wordt het Kaimal spectrum aangewend voor turbulentiebeschrijving in een vast punt en een daarbijbehorende coherentiefunctie. Beide functies worden in Figuur 5-1 getoond.



Figuur 5-1: coherentiefunctie en APSD voor turbulentie ingeval van een 3 bladige rotor

De coherentie functies voor 20m en hoger tonen dat rotor-brede vlagen zich zelden zullen voordoen voor frequenties groter dan 0.1Hz tot 0.2Hz. De middelste lijn in de APSD onderscheidt duidelijk een zogenaamde 0p, 3p en 6p mode. De 0p-component kan geïnterpreteerd worden als het vermogensspectrum van het rotor-uniforme deel van het windveld. De dip rond 0.6Hz geeft aan dat de rotor de windvlagen in zekere mate uitmiddelt, zoals ook eerder bleek uit de coherentiefunctie. De 3p en 6p pieken zijn een gevolg van 'roterend bemonsteren' van de drie rotorbladen.

De longitudinale windsnelheidsvariates door *windschering* worden eveneens volgens de IEC61400-1 standaard opgenomen. De variates worden voor elk blad op tweederde van de rotorstraal bepaald. De rotorazimut afhankelijke bijdrage tot de rotoeffectieve windsnelheid wordt bepaald door middeling van het verloop van de windschering over die hoek op de drie individuele bladen.

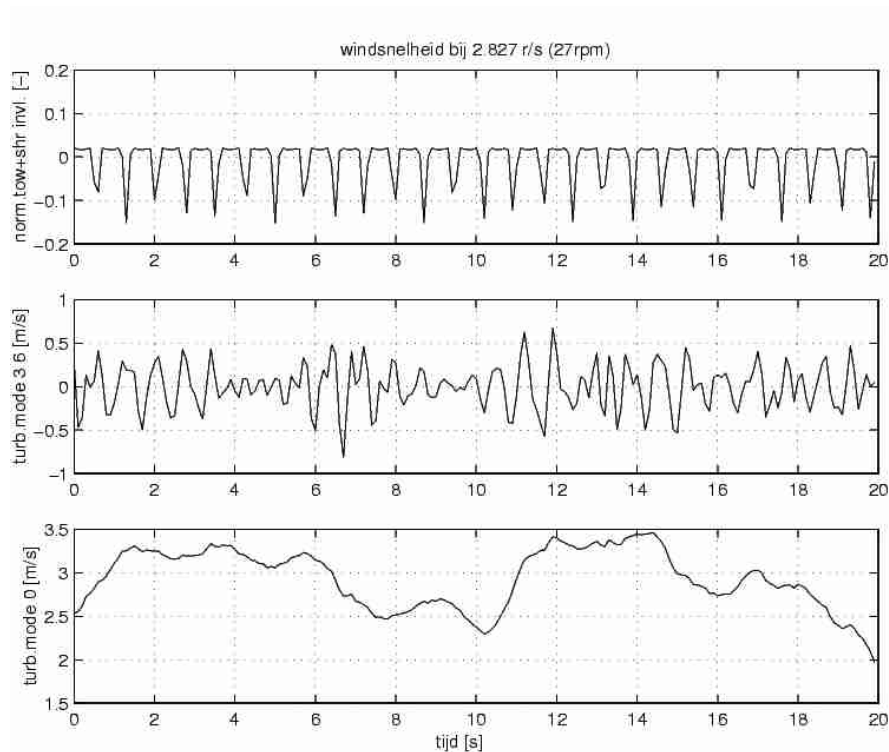
De invloed van *torenpassage* wordt bepaald op grond van de theorie voor 3D potentiaalstroming voor een half oneindige dipool. Alleen de longitudinale component draagt bij tot rotoeffectieve windsnelheid.

Uit de APSD wordt via inverse Fourier transformatie een tijdrealisatie voor toepassing in simulaties afgeleid. De torenschaduw en de windschering worden reeds azimut afhankelijk en periodiek (modulo 2π) beschreven. De stationaire rotoeffectieve windsnelheid is het verloop van de windsnelheidsvariates door turbulentie, torenschaduw en windshear vermeerderd met de gemiddelde windsnelheid (bijvoorbeeld 10min gemiddelde). In tijdsimulaties wordt het verloop $V_w(t)$ berekend uit de vooraf bepaalde genormaliseerde periodieke en turbulente invloeden volgens onderstaande betrekking:

$$\Psi = \int_0^t \Omega \, dt$$

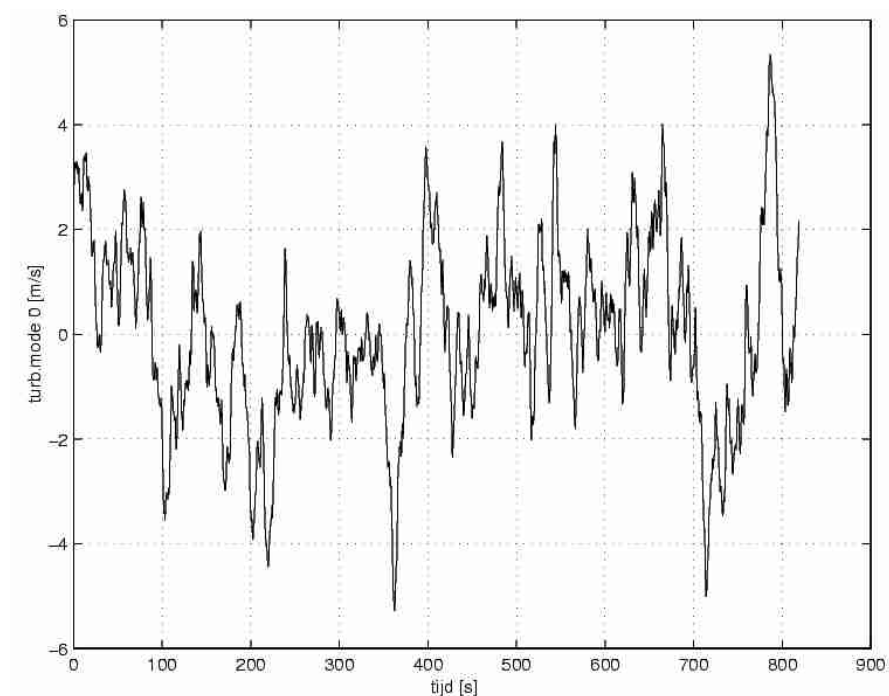
$$V_w^{eff} = \bar{V}_w \cdot [1 + \hat{v}_w^{tur}(\Psi)] + \bar{V}_w \cdot [1 + \hat{v}_w^{tur_{0p}}(\Psi)] \cdot [\hat{v}_w^{tow}(\Psi \bmod 2\pi) + \hat{v}_w^{shr}(\Psi \bmod 2\pi)]$$

Figuur 5-2 toont een detail van de variatiebijdragen tot een windsnelheidsrealisatie.



Figuur 5-2: detail van rotoruniforme, roterend bemonsterde en genormaliseerd periodieke bijdrage tot de rotoeffectieve windsnelheid.

De tijdrealisatie van de genormeerde rotor uniforme windsnelheid (0p-mode) over meer dan 10 minuten is weergegeven in Figuur 5-3. Hierin zijn de 3p- en 6p componenten buiten beschouwing gelaten, evenals de periodieke componenten ten gevolge van windschering en torenpassage.



Figuur 5-3: tijdrealisatie van de genormaliseerde rotoruniforme windsnelheid

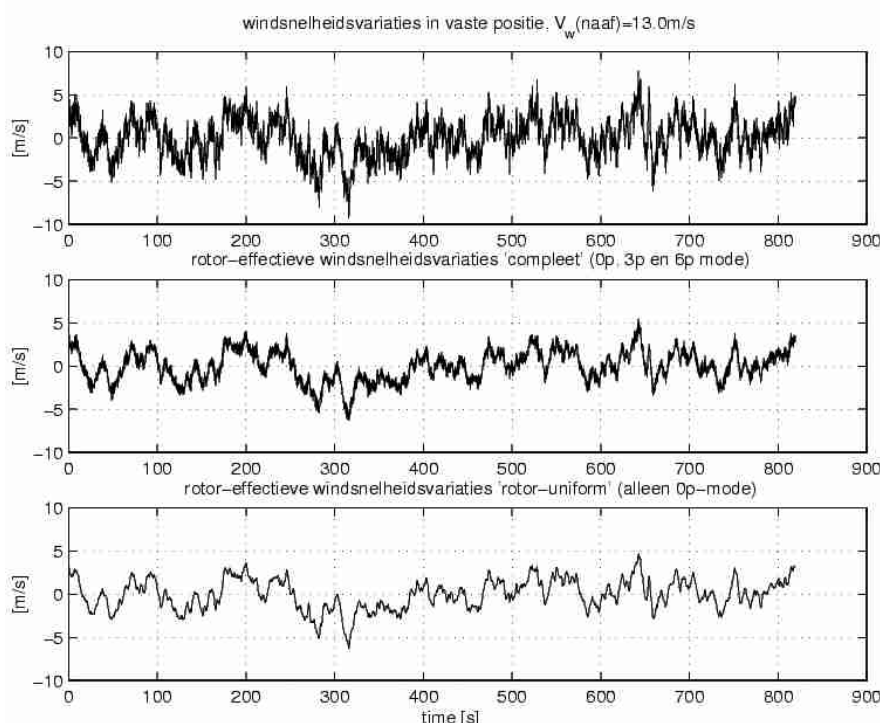
Bladeffectieve windsnelheden:

Bladeffectieve windsnelheden zijn noodzakelijk om stochastische krui- en tiltmomenten op te kunnen nemen in de processimulatie. Per blad is er nu sprake van een éénpuntswindsignaal dat een buigmoment aan de bladwortel in klaprichting teweegbrengt, dat stochastisch equivalent is aan het resultaat van de bladelement-impulstheorie bij een turbulent windveld.

De afleidingswijze is vergelijkbaar met die voor het rotoffectieve windsignaal, echter de windsnelheden tussen de bladen zijn nu slechts gedeeltelijk gecorreleerd. Door deze ruimtelijke verschillen resulteren de gesommeerde bladklap-buigmomenten in tilt- en kruikoppelvariaties

Windsnelheid in een vast punt:

Een windsnelheidsmeting meet windsnelheid in een vast punt, bijvoorbeeld op de gondel achter de rotor. Uit de eerdere analyse van die leidde tot rotoffectieve windsnelheid, kunnen eenvoudig de windsnelheidsvariaties worden bepaald in een vast punt (hier het rotorcentrum). De bovenste tijdrealisaties van Figuur 5-4 toont dat de fluctuaties aanzienlijk groter zijn door het ontbreken van het middelende effect van de rotor.



Figuur 5-4: windsnelheidsrealisaties in een vaste positie met daaronder twee realisaties waaruit duidelijk de middelende invloed van de rotor blijkt.

Een realistischere benadering voor een positie op de gondel achter de rotor is het wellicht nodig om voor dit windpunt-signaal uit te gaan van een nog hogere turbulentie-intensiteit en een 'filtering' om tegemoet te komen aan de effecten van het rotorzog (periodieke bladpassage).

events

In de veiligheidsstandaard IEC61400-1 [A3] worden een aantal windsnelheidssignalen gedefinieerd die voor processimulatie waardevolle gebeurtenissen zijn om mee te simuleren:

- extreme wind speed model (EWM), de 1-jaars en 50-jaars extreme windvlaag;
- extreme operating gust (EOG), de zogenaamde 'mexicaanse hoed';
- extreme coherent gust (ECG), de toenemende extreme windvaalg;

Met dergelijke toe- en afnemende extreme windvlagen kan de reactie van het windturbine-besturingssysteem beoordeeld worden. Ook verschaft het inzicht in de kwaliteit van bijvoorbeeld een vermogens- of toerentalregeling.

externe interacties

Windsnelheid zal een sterke interactie hebben met:

- bladensysteem (aërodynamische conversie en aërodynamisch koppel, axiaalkracht);
- meteosysteem (windsnelheidsmeting);
- golven.

5.1.2 Windrichting

samenstelling

Voor windrichting worden voor processimulatie de volgende constante eigenschappen onderscheiden:

- turbulentie-intensiteit;
- parameters voor Kaimalspectrum van de zijwaartse windsnelheidscomponent;
- naafhoogte (rotorcentrum).

fenomenen

Voor windrichting worden voor processimulatie het volgende continu gedrag onderscheiden:

- windrichting in een punt.

Er wordt afgezien van het gebruik van rotor- en bladeffectieve windrichtingsignalen bij processimulatie. De reden hiervoor is dat de invloed van de hiermee samenhangende zijwaartse windsnelheidsvariëaties op de rotorbelastingen veel kleiner is dan van de longitudinale.

windrichting in een vast punt:

Op grond van realisaties (inverse FFT) van het Kaimal spectrum voor zijwaartse windsnelheidsvariëaties kunnen de stochastische windrichtingvariëaties bij processimulatie bepaald worden uit: de arctangens van de momentane verhouding tussen de zijwaartse en (éénpunts)longitudinale windsnelheidscomponent. Dit signaal gaat de windrichtingsmeting in.

events

In de veiligheidsstandaard IEC61400-1 [A3] wordt een aantal windrichtingveranderingen gedefinieerd die voor processimulatie van belang zijn:

- extreme windrichtingveranderingen bij gelijk blijvende windsnelheid;
- extreme windrichtingveranderingen bij gelijktijdig optredende windsnelheidsvlagen.

Extreme, aanhoudende, windrichtingveranderingen leiden tot een periodieke variatie op het aërodynamisch aandrijvend koppel. Via de tilhoek leidt dit tot een periodiek kruimoment.

externe interacties

Windrichting zal een sterke interactie hebben met:

- bladensysteem (aërodynamische conversie en aërodynamisch koppel, axiaalkracht);
- meteosysteem (windsnelheidsmeting).

5.2 Golven

Het medium golven is een continue stochastische grootheid die beschreven wordt door spectrale eigenschappen (Pierson-Moskowitz). Voor een beschrijving van golven is het voor processimulatie van belang om de interactie met de toren en fundering te beschouwen (golhverstoren, MacCamy Fuchs correctie). Gedurende processimulaties wordt er vanuit gegaan dat golfrichting niet verandert (aanstroomhoek) en dat het golvenpatroon toebehoort aan de gemiddelde windsnelheid waarbij de processimulatie wordt uitgevoerd.

samenstelling

Voor golven worden voor processimulatie de volgende constante eigenschappen onderscheiden:

- parameters voor Pierson Moskowitz spectrum (gemiddelde windsnelheid, gravitatieconstante);
- torendiameter;
- waterdiepte.

fenomenen

Voor processimulatie zijn horizontale golfbewegingen relevant voor verschillende waterdieptes en windsnelheden. Hierbij wordt uitgegaan van zogenaamde lage golven, de golfhoogte hiervan is relatief klein is ten opzichte van de golflengte en waterdiepte.

Horizontale golfsnelheid en -versnelling:

In geval van lage golven is de lineaire golftheorie van toepassing (Airy's theorie). Hierin worden twee belangrijke uitgangspunten beschreven:

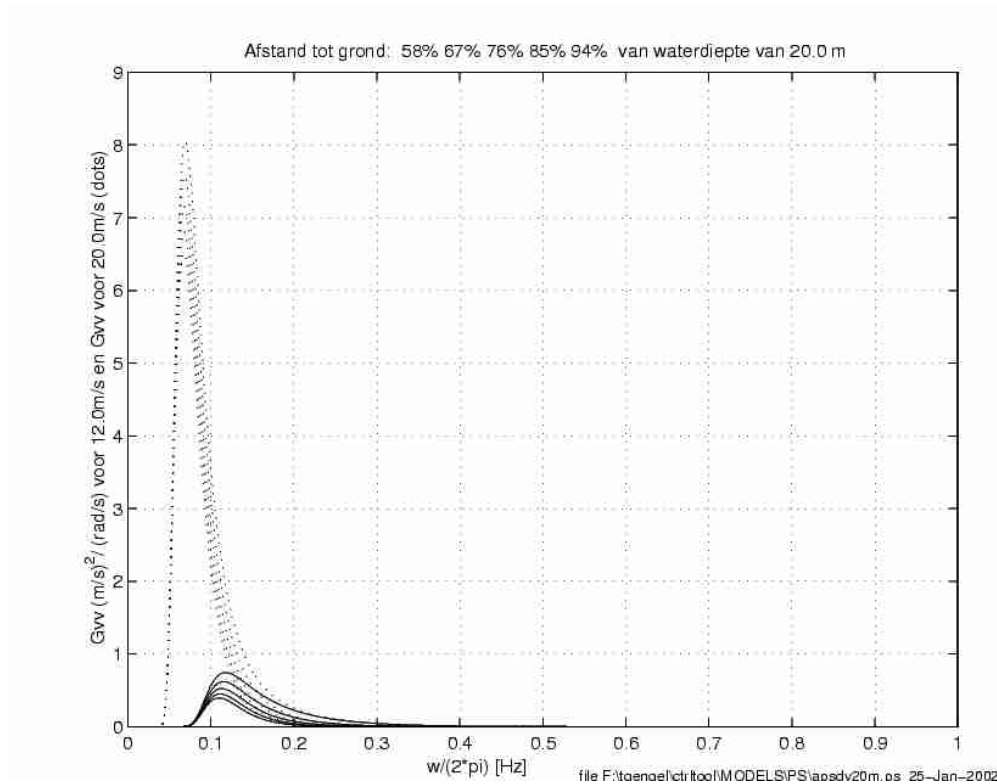
- in deze theorie zijn de waterversnelling en watersnelheid op willekeurige afstanden tot het wateroppervlak volledig bepaald door de oppervlaktegolving (waterverheffing, elevatie) onder een schalingsfactor welke afhangt van die afstand tot het wateroppervlak en de golflengte en -frequentie;
- de zogeheten dispersierelatie, die het eenduidige verband tussen golflengte, waterdiepte en golffrequentie vastlegt.

Bij hogere golffrequentie blijkt dat de 'onderwaterinvloed' zich het sterkst doet gelden. Het stochastische karakter van golven wordt beschreven door het hiervoor vaak gebruikte Pierson-Moskowitz golfspectrum voor golfelevatie. In dit (enkelzijdige) spectrum is de (gemiddelde) windsnelheidsafhankelijkheid opgenomen, die bovendien een vaste relatie blijkt te hebben met de significante golfhoogte via de gravitatieconstante.

Een tijdrealisatie van het spectrum voor golfelevatie resulteert in een reeks van reële harmonische elevatiecomponenten met random fasehoeken vanwege het stochastische karakter. Voor de elevatie afhankelijke uitdrukkingen van waterversnelling en watersnelheid uit de lineaire golftheorie kunnen nu reële harmonische reeksen (tijdrealisaties) worden afgeleid en de daarbij behorende spectrale beschrijvingen. Het spectrum voor watersnelheid en -versnelling worden dan uiteindelijk beschreven volgens onderstaande uitdrukkingen die in Figuur 5-5 worden getoond:

$$G_{w(z)}(w_l) = w_l^2 \cdot \left(\frac{\cosh(2p/l_l \cdot (d - z))}{\sinh(2p/l_l \cdot d)} \right)^2 \cdot G_h(w_l)$$

$$G_{\dot{w}(z)}(w_l) = w_l^4 \cdot \left(\frac{\cosh(2p/l_l \cdot (d - z))}{\sinh(2p/l_l \cdot d)} \right)^2 \cdot G_h(w_l).$$



Figuur 5-5: enkelzijdig spectrum voor de amplitude van de horizontale golfsnelheid bij Pierson-Moskowitz golfspectrum voor windsnelheden van 12m/s (golfhoopte 3.1m) en 16m/s (gestippeld, golfhoopte 5.4m) bij verschillende afstanden tot het wateroppervlak (1,3,5,7 en 9m) en een totale waterdiepte van 20m.

Krachteffectieve golfversnelling:

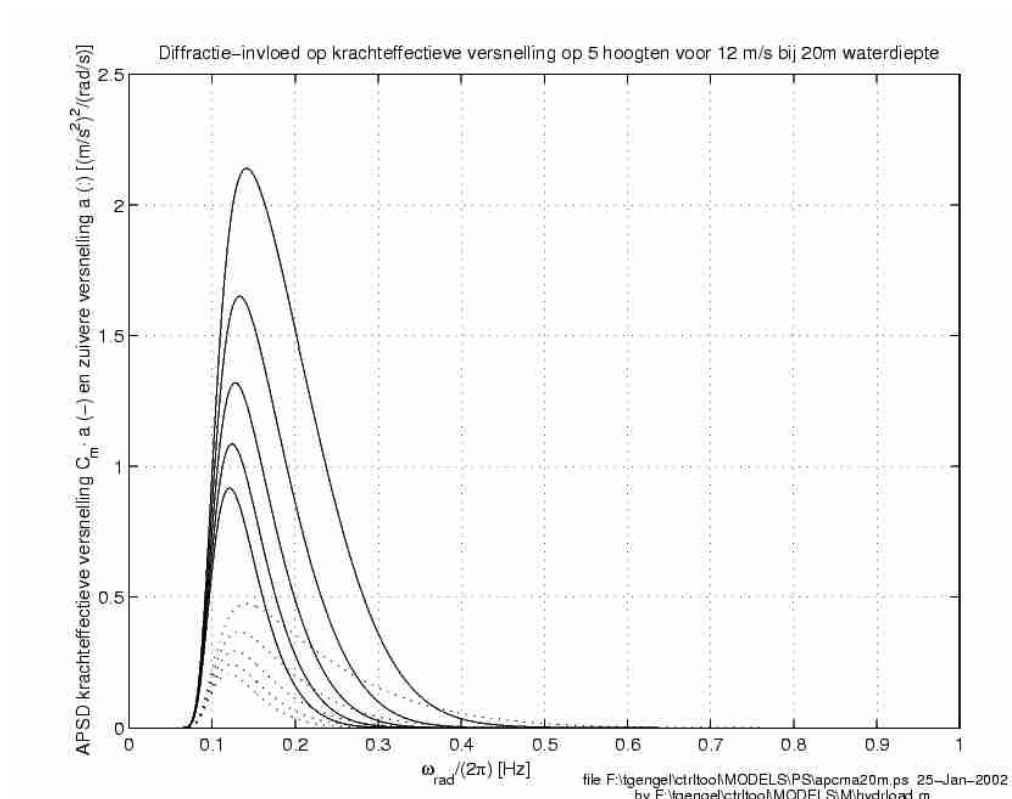
De hierboven spectraal beschreven golven zullen de turbinetoren treffen (diffractie). Voor tijdrealisaties van, de met weerstandskrachten samenhangende, golfsnelheid kan zonder verdere aanpassing het eerder beschreven spectrum worden gebruikt.

Voor de, met de met massakrachten samenhangende, golfversnelling treedt er echter door de aanwezigheid van de toren golfverstoring op. De mate van verstoring wordt met name bepaald door de verhouding tussen torendiameter en golflengte en hangt dus via de dispersierelatie ook samen met de golffrequentie.

De diffractie effecten in de spectrale beschrijving van golfversnelling kunnen met een frequentieafhankelijke massacoëfficiënt in rekening worden gebracht:

$$G_{\dot{w}^{eff}(z)}(w) = C_m(w)^2 \cdot G_{\dot{w}(z)}(w).$$

Voor deze correctie wordt de relatie van MacCamy en Fuchs gebruikt. Deze niet lineaire relatie geeft voor golven die groter zijn dan tien keer de torendiameter een massacoëfficiënt ter grootte van ongeveer twee. De massacoëfficiënt neemt af tot circa 0.4 bij golflengtes ter grootte van de torendiameter. Het voor diffractie gecorrigeerde spectrum voor waterversnelling wordt de krachteffectieve golfversnelling genoemd. De krachteffectieve golfversnelling wordt samen met de 'ongestoorde' golfversnelling weergegeven in Figuur 5-6.



Figuur 5-6: enkelzijdig spectrum voor de amplitude van ‘ongestoorde’ en krachtheffektieve horizontale golfversnelling voor een windsnelheid van 12m/s (golfhoogte 3.1m) bij verschillende afstanden tot het wateroppervlak (1,3,5,7 en 9m) en een totale waterdiepte van 20m.

Vanuit het golfsnelheidsspectrum en krachtheffektieve golfversnellingsspectrum worden de tijdrealisaties voor 12 m/s windsnelheid voor vijf afstanden tot aan het wateroppervlak in Figuur 5-7 weergegeven.

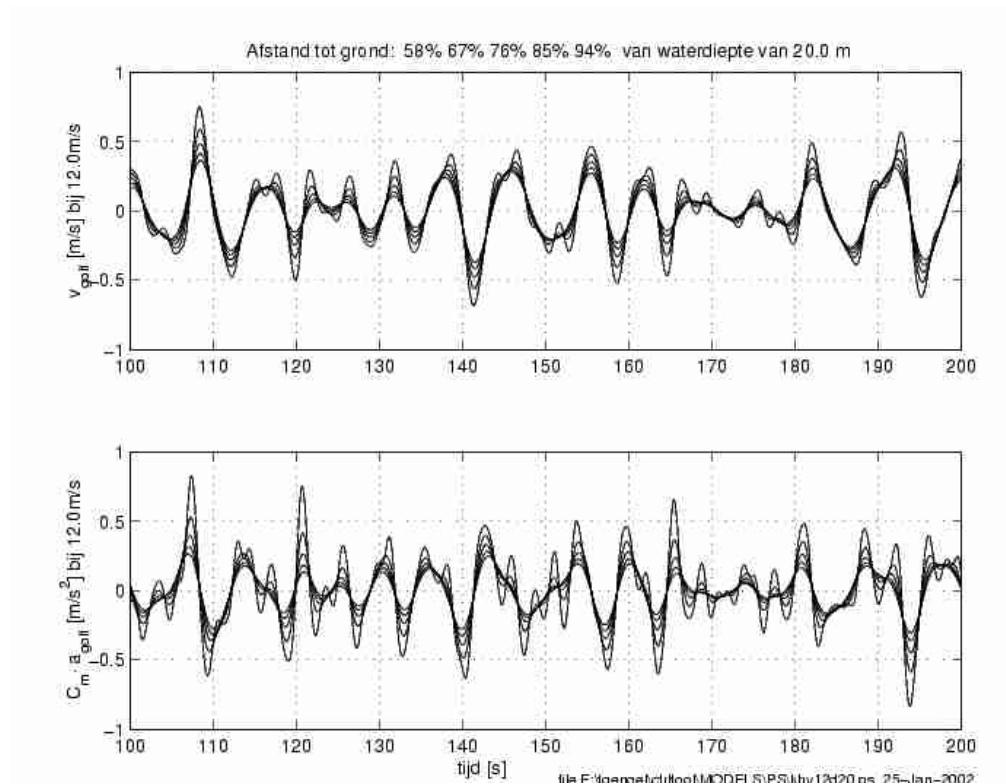
events

Voor windsnelheid worden voor processimulatie het volgende discrete gedrag onderscheiden:

- extreme (krachtheffektieve) golfversnelling;

externe interacties

- toren- en fundatiesysteem (diffractie);
- wind (golfamplitude).



Figuur 5-7: tijdrealisaties (200s) voor horizontale golfsnelheid (boven, Pierson Moskowitz) en krachtheffatieve golfversnelling (onder, MacCamy Fuchs correctie) bij 12m/s (golfhoogte 3.1m) bij verschillende afstanden tot het wateroppervlak (1,3,5,7 en 9m) en een totale waterdiepte van 20m.

5.3 Grond

Grond wordt voor processimulatie als een passief medium beschouwd.

samenstelling

Voor grond worden voor processimulatie de volgende constante eigenschappen onderscheiden:

- structuur van de grond ter bepaling van stijfheid en demping

fenomenen

Bij processimulatie van grond worden alleen die dynamische verschijnselen betrokken die van invloed zijn op het bewegen van de toren. Het enige fenomeen dat dan een rol speelt betreft de inklemming van de toren in zowel voor-/achterwaartse als zijwaartse richting.

Een eenvoudige benadering om deze dynamica te verdisconteren is het toevoegen van een lengtedeel ter grootte van een torendiameter.

Een nauwkeurigere benadering kan in combinatie met een 'lumped parameter torenmodel' worden bereikt. De inklemming van de toren wordt dan voorgesteld door een of meerdere extra puntmassa's, die met elkaar verbonden zijn door representatieve (fundatie)veren en (fundatie)dempers.

events

Voor grond wordt er geen discreet gedrag voorzien. Het optreden van aardbevingen of aardtrillingen wordt vooralsnog niet opgenomen.

externe interacties

- Toren- en fundatiesysteem.

5.4 Elektriciteitsnet

Het elektriciteitsnet ‘als medium’ betreft de elektrische interactie die door het net heeft op de windturbine. Voor het continue en discrete gedrag van het elektriciteitsnet zullen aankomende (IEC) neteisen of netcodes worden meegenomen om het besturingssysteem ook ten aanzien hiervan te kunnen testen.

samenstelling

Voor het elektriciteitsnet worden voor processimulatie de volgende constante eigenschappen onderscheiden:

- netfrequentie en variatie hierop;
- netspanning en variatie hierop;
- voorkomende netspanningsdip;
- complexe net-impedantie (kabel, transformator);
- afschakeltijd en –stroom onderstationschakelaar.

fenomenen

De fenomenen die optreden ten aanzien van interactie met het elektriciteitsnet zullen beschouwd worden uit oogpunt van de windturbine. Dynamische netverschijnselen worden hiertoe niet gerekend, deze vallen evenals netasymmetrie in eerste instantie buiten de scope van de processimulator. Voor continu gedrag vanuit het elektriciteitsnet worden wel voorzien:

- het uitwisselen van werkelijk en reactief vermogen aan het elektriciteitsnet, hiervoor zal een quasi-stationaire benadering worden gevolgd volgens het principe van vermogens-uitwisseling over een net-impedantie;
- kortsluitgedrag van het elektriciteitsnet (afschakeltijd, stroomtoename);
- het gedrag van afwijken en variëren van de door het elektriciteitsnet opgedrukte netfrequentie en netspanning;
- het gedrag door injectie van harmonisch vervormde netstromen vanwege (zware) naburige installaties.

events

Voor het elektriciteitsnet wordt voor processimulatie het volgende discrete gedrag onderscheiden:

- driefasenkortsluiting ter plekke bij de turbineaansluiting;
- fase-aarde kortsluiting ter plekke bij de turbineaansluiting;
- fase-fase kortsluiting ter plekke bij de turbineaansluiting;
- wegvallen van de netkoppeling;
- het creëren van een kortstondige spanningsdip;

externe interacties

- Elektrisch conversiesysteem (elektrische grootheden);
- Voedingssysteem (netspanning, beschikbaarheid);
- Beveiligingssysteem (beschikbaarheid);

6. CONCLUSIE

Voor twee conceptueel verschillende turbines, te weten de LW50-750/B2a (Lagerwey the Windmaster) en de NW62/3/1000 turbine (NEWINCO) is een systeemanalyse gemaakt ter voorbereiding op de modellering en implementatie taken zoals deze in projectfase II worden voorzien.

Tabel 6-1: conceptuele verschillen voor LW50-750/B2a en NW62/3/1000 turbine.

	LW50-750/B2a	NW62/3/1000
Transmissie	direct drive	tandwielkast
Conversie	back to back converter (IGBT's)	softstarter met bypass (thyristoren)
Generator	synchrone multipool generator	asynchrone twee toeren generator
Bladverstelling	elektrische onafhankelijke bladverstelling naar vaanstand	hydraulische mechanisch gekoppelde bladverstelling naar overtrek

De gevolgde werkwijze, in overeenstemming met Volume I: Probleemanalyse, [A2], blijkt, na deze twee verschillende systeemanalyses te hebben uitgevoerd, geschikt te zijn om op gestructureerde wijze de voor processimulatie benodigde aspecten ten behoeve van systeem- en componentmodellering te onderscheiden en te beschrijven.

De resultaten uit fase I (probleemanalyse [A2], inventarisatie[A4][A5] en in dit rapport gepresenteerde definitie) bieden een goede basis om de modellerings- en implementatetaak in fase II aan te vangen. Een nauwe samenwerking met windturbinefabrikanten is tijdens uitvoering van fase I noodzakelijk gebleken om inzage te krijgen in de veelal vertrouwelijke turbinegegevens.

Windturbinefabrikant NORDEX en NEG-MICON heeft reeds concrete belangstelling getoond om samen te werken tijdens uitvoering van fase II aan de hand van een moderne multi-megawatt (offshore) turbine.

De huidige industriële belangstelling (Lagerwey, NEWINCO, NORDEX, NEG-MICON) onderstreept de behoefte aan een processimulatiegereedschap voor windturbinebesturingen. Hiermee zal rekening worden gehouden in het projectplan voor fase II.

7. REFERENTIES

- A1 Engelen, T.G. van; Hooft, E.L. van der; Schaak, P., Ontwerpgereedschappen voor de regeling van windturbines (conceptversie), ECN-I--03-xxx, Petten, 29 Juni 2001.
- A2 Engelen, T.G. van; Schaak, P., Processimulator voor windturbinebesturingen, Volume 1: Probleemanalyse, ECN-C--01-112, Petten, November 2001.
- A3 IEC, Windturbine generator systems - Part 1: Safety requirements, IEC61400-1, Geneva, 1999/02 second edition;
- A4 Hooft, E.L. van der; Verbruggen, T.W., Processimulator voor windturbinebesturingen, Annex A: Systeeminventarisatie LW50-750/B2a, ECN-CX--02-090, Petten, Oktober 2002.
- A5 Verbruggen, T.W.; Hooft, E.L. van der, Processimulator voor windturbinebesturingen, Annex B: Systeeminventarisatie NW62/3/1000, ECN-CX--02-043, Petten, Oktober 2002.

BIJLAGE A SYSTEEM-ANALYSE SJABLOON

Systeemnaam

0. Logging
 - *bronvermeldingen v.v. datum/referentie/verstrekker*
 - *niet gevonden informatie*
 - *onduidelijkheden/strijdigheden*
1. Fysieke Samenstelling
 - *Uit welke fysieke componenten en deelsystemen bestaat dit systeem?*
 - *Fabrikaat en type hiervan?*
2. Besturings-strategie
 - *Doel van desbetreffende systeem?*
 - *Welke bedrijfsmodi kent het systeem?*
 - *Welke besturingscriteria en -regels?*
 - *Op basis van welke metingen en gegevens acteert het besturingssysteem?*
 - *Met welke componenten en deelsystemen worden corrigerende acties uitgevoerd?*
 - *Welke bedieningsknoppen en signaleringen?*
3. Metingen en detecties

Per meting of detectie beschrijven:

 - *Hoe is de meting/detectie fysiek uitgevoerd?*
 - *Welke (fysisch) beginsel ligt aan de meting/detectie ten grondslag?*
 - *Hoe wordt het meet/detectieresultaat aangeboden (signaalbewerkingen) aan het besturingssysteem?*
 - *Welk meetbereik? welke resolutie? bandbreedte?*
 - *Hoe wordt de meting/detectie door het besturingssysteem gevalideerd?*
 - *Hoe wordt de meting/detectie gevoed?*
 - *Welke signalen worden ervan afgeleid (door het besturingssysteem)?*
 - *Voor welke systemen wordt de meting/detectie nog meer gebruikt?*
4. Conditionele logica
 - 4.1. Reactie van besturingssysteem naar corrigerende organen

Voor ieder corrigerend orgaan:

 - *Welke logische voorwaarden verwezenlijken de (re)actie van het besturingssysteem?*
 - *Welke (dominante) dynamica is hierin herkenbaar?*
 - *Welke voedingsvoorwaarden zijn hieraan verbonden?*
 - 4.2. Alarmreacties van het besturingssysteem

Voor ieder alarm:

 - *Wat voor soort alarm?*
 - *Op basis van welke grootheden?*
 - *Gevolg van het alarm?*
 - *Opheffen van het alarm?*

5. I/O naar het besturingssysteem
 - 5.1. Ingangen
 - Welke ingangen gebruikt de besturing (AI, DI, PI, bus..)
 - Omschrijving van het aangeboden signaal per ingang
 - Eventueel een referentie per ingang
 - 5.2. Uitgangen
 - Welke uitgangen gebruikt de besturing (AI, DI, PI, bus..)
 - Omschrijving van het aangeboden signaal per uitgang
 - Eventueel een referentie per uitgang
6. Systeemanalyse voor processimulatie
 - 6.1. Systeemhierarchie
 - Windturbinedeel: kies : ondersteuningsconstructie / drive train / rotor
 - Deelsystemen: eventuele break down windturbinedeel
 - Componenten: eventuele break down deelsystemen
 - 6.2. Systeemmodellering
 - 6.2.1. Samenstellingen (constante eigenschappen)
 - Welke niet-veranderlijke eigenschappen bezitten de componenten binnen desbetreffend systeem?
 - 6.2.2. Continu gedrag (fenomenen)
 - Welke tijdcontinue componentdynamica dient voorzien te worden binnen desbetreffend systeem?
 - Welke benadering is geschikt voor simulatie?
 - Welke dynamische interacties met andere systemen en media zijn hierbij betrokken?
 - 6.2.3. Discreet gedrag (events, statussen)
 - Welke events en statussen dienen voorzien te worden binnen desbetreffend systeem?
 - Welke benadering is geschikt voor simulatie?
 - Welke logische interacties met andere systemen en media zijn hierbij betrokken?
 - 6.3. Mogelijkheden tot hardware in the loop
 - Is er perspectief of het systeem, een deel ervan of een component als HIL op te nemen?
 - Welke voordelen/nadelen levert dat op voor gebruiker en simulator?
 - Welke simulatievoorzieningen dienen hiervoor te worden gedisabled?
 - Welke extra simulatievoorzieningen zijn hiervoor nodig?
 - Welke interacties met andere systeemcomponenten, systemen of media zijn hierbij betrokken?
 - 6.4. Interacties
 - Externe systeeminteracties: welke interacties naar andere systemen en media?
 - Interne systeeminteracties: welke onderlinge (deel)systeeminteracties?

BIJLAGE B MEDIA-ANALYSE SJABLOON

Mediumnaam

0. Logging

1. Mediumhierarchy

- *Onderverdeling in componenten op basis van fenomenen en events*

2. Systeemmodellering

2.1. Samenstelling (constante eigenschappen)

- *Welke niet-veranderlijke eigenschappen bezitten de componenten binnen desbetreffend medium?*

2.2. Samenstellingen (constante eigenschappen)

- *Welke niet-veranderlijke eigenschappen bezitten de componenten binnen desbetreffend medium?*

2.3. Continu gedrag (fenomenen)

- *Welke tijdcontinue componentdynamica dient voorzien te worden binnen desbetreffend medium?*
- *Welke benadering is geschikt voor simulatie?*
- *Welke dynamische interacties met andere media en systemen zijn hierbij betrokken?*

2.4. Discreet gedrag (events, statussen)

- *Welke events en statussen dienen voorzien te worden binnen desbetreffend systeem?*
- *Welke benadering is geschikt voor simulatie?*
- *Welke logische interacties met andere media en systemen zijn hierbij betrokken?*

3. Externe interacties

- *welke interacties naar andere systemen en media?*