

# REQUIREMENTS FOR GENERATORS (RfG) – KRAV TIL SIMULERINGSMODEL



Energinet  
Tonne Kjærvej 65  
DK-7000 Fredericia

+45 70 10 22 44  
info@energinet.dk  
CVR-nr. 28 98 06 71

Dato:  
7. maj 2018

Forfatter:  
LAN/CFJ/CSH

A	DRAFT	LAN CFJ CSH	FBN JMI	MPO HAB KDL JGA VLA JKW	SBN PHT	[DATO]
						[NAVN]
						[DATO]
						[NAVN]
REV.	DESCRIPTION	PREPARED	CHECKED	REVIEWED	APPROVED	

NR.	TEKST	VERSION	DATO

Nærværende notat omfatter Energinets krav til simuleringsmodeller i forbindelse med nettilslutning af produktionsanlæg. Notatet indgår som baggrundsnotat i forbindelse med implementering af EU forordning 2016/631, *Requirements for Generators (RfG)* [1], og omhandler således krav til synkrone produktionsanlæg og asynkrone (onshore og offshore) produktionsanlæg, jf. definitionen af disse.

Notatet beskriver:

- Funktionelle krav til de påkrævede simuleringsmodeller
- Krav til strukturel opbygning og implementering af de påkrævede simuleringsmodeller
- Dokumentationskrav for påkrævede simuleringsmodeller
- Nøjagtighedskrav til de påkrævede simuleringsmodeller
- Valideringskrav for de påkrævede simuleringsmodeller

# INDHOLD

1. Baggrund .....	3
2. Gennemsnitlige krav til simuleringsmodel .....	3
2.1 Særlige forhold vedrørende modelleverance for asynkrone produktionsanlæg (Type C) .....	4
2.2 Overordnet dokumentationskrav .....	4
3. Modeltekniske krav .....	5
3.1 Synkrone produktionsanlæg .....	5
3.1.1 Krav til stationær simuleringsmodel (stationære forhold og kortslutningsforhold) .....	5
3.1.2 Krav til dynamisk simuleringsmodel (RMS-model) .....	6
3.1.3 Krav til transient simuleringsmodel (EMT-model) .....	11
3.1.4 Krav til harmonisk simuleringsmodel .....	11
3.2 Asynkrone produktionsanlæg .....	12
3.2.1 Krav til stationær simuleringsmodel (stationære forhold og kortslutningsforhold) .....	12
3.2.2 Krav til dynamisk simuleringsmodel (RMS-model) .....	13
3.2.3 Krav til transient simuleringsmodel (EMT-model) .....	19
3.2.4 Krav til harmonisk simuleringsmodel .....	21
4. Verifikation af simuleringsmodel .....	22
4.1.1 Verifikationskrav til stationær simuleringsmodel (stationære- og kortslutningsforhold) .....	22
4.1.2 Verifikationskrav til dynamisk simuleringsmodel (RMS-model) .....	22
4.1.3 Verifikationskrav til transient simuleringsmodel (EMT-model) .....	24
4.1.4 Verifikationskrav til harmonisk simuleringsmodel .....	24
5. Referencer .....	25
Bilag 1 .....	26

## 1. Baggrund

Den igangværende omstilling af elsystemet, hvor konventionelle produktionsanlæg gradvist udfases og erstattes af mere komplekse produktionsanlæg medfører, at den systemansvarlige virksomhed har brug for større indsigt i disse nye anlægs strukturelle opbygning og deres systemmæssige påvirkning af det kollektive elforsyningsnet.

Til analyseformål vedrørende planlægning og drift af det kollektive elforsyningsnet har den systemansvarlige virksomhed behov for at kunne gennemføre net- og systemanalyser, fx i forbindelse med nettilslutning af nye produktionsanlæg. Til dette formål kræves opdaterede og retvisende simuleringsmodeller for nettilsluttede forbrugs- og produktionsanlæg.

Simuleringsmodellerne benyttes til analyse af transmissions- og distributionsnettets stationære- og dynamiske forhold, herunder spændings-, frekvens- og rotorvinkel stabilitet, kortslutningsforhold, transiente fænomener samt harmoniske forhold.

## 2. Gennemse krav til simuleringsmodel

Anlægsejeren skal stille simuleringsmodeller til rådighed for den systemansvarlige virksomhed, hvor disse simuleringsmodeller skal på korrekt vis afspejle produktionsanlæggets egenskaber både i stationær- og quasi-stationær tilstand. Til brug ved tidsdomæneanalyser skal Anlægsejeren desuden stille en dynamisk simuleringsmodel (RMS-model) og en transient simuleringsmodel (EMT-model) til rådighed for den systemansvarlige virksomhed. Til analyse af harmoniske forhold i det kollektive elforsyningsnet, herunder produktionsanlæggets bidrag til harmonisk emission i nettilslutningspunktet, skal Anlægsejeren ligeledes stille en harmonisk simuleringsmodel til rådighed herfor.

Kravet til simuleringsmodeller og leveringsomfang for de enkelte typer af produktionsanlæg fremgår af **Tabel 1**. Anlægsejeren er ansvarlig for, at en sådan modelfremsendelse finder sted til rette tid i henhold til den gældende procedure for nettilslutning af produktionsanlæg og forordningens øvrige bestemmelser.

Produktionsanlægstype	Synkrone produktionsanlæg	Asynkrone produktionsanlæg
<b>Type A</b>	Intet krav om simuleringsmodel	Intet krav om simuleringsmodel
<b>Type B</b>	Intet krav om simuleringsmodel	Intet krav om simuleringsmodel
<b>Type C</b>	Stationær simuleringsmodel RMS-simuleringsmodel	Stationær simuleringsmodel RMS-simuleringsmodel
<b>Type D</b>	Stationær simuleringsmodel RMS-simuleringsmodel	Stationær simuleringsmodel RMS-simuleringsmodel EMT-simuleringsmodel Harmonisk simuleringsmodel

*Tabel 1 Krav til simuleringsmodeller for de enkelte typer af produktionsanlæg*

Anlægsejeren skal sikre, at simuleringsmodellerne er verificeret med resultaterne af de definerede overensstemmelsesprøvninger [1] samt relevante test- og valideringsstandarder og fremsende den nødvendige dokumentation herfor.

Såfremt produktionsanlægget indeholder eksterne komponenter, fx af hensyn til overholdelse af nettilslutningskravene eller til levering af kommercielle systemydelser, skal simuleringsmodellen indeholde den nødvendige repræsentation af disse komponenter gældende for alle påkrævede modellertyper.

Anlægsejeren skal, fra produktionsanlæggets designfase til tidspunktet for meddelelse af endelig nettilslutningstilladelse, løbende holde den systemansvarlige virksomhed orienteret, hvis de foreløbige anlægs- og modeldata ikke længere kan antages at repræsentere det endeligt idriftsatte produktionsanlæg.

For et eksisterende produktionsanlæg, hvor der foretages *væsentlige ændringer* af produktionsanlæggets egenskaber, skal Anlægsejeren stille en opdateret<sup>1</sup> og fuld dokumenteret simuleringsmodel til rådighed for det ombyggede anlæg.

Modelleverancen betragtes først som afsluttet, når den systemansvarlige virksomhed har godkendt den af Anlægsejeren fremsendte simuleringsmodel og den påkrævede dokumentation.

### 2.1 Særlige forhold vedrørende modelleverance for asynkrone produktionsanlæg (Type C)

For asynkrone produktionsanlæg (Type C) bestående af samme type enkeltanlæg (fx en specifik vindmølletype eller solcelleinverter) og hvor der ikke anvendes site-specifikke funktioner for produktionsanlæggets kontrol-, beskyttelses-, og reguleringsfunktioner, herunder parkregulator, kan den påkrævede modelleverance ske i form af en valideret simuleringsmodel for det anvendte enkeltanlæg og parkregulator, hvor en sådan anvendes. Øvrige modeltekniske krav for denne type produktionsanlæg fremgår af **Afsnit 3.2**.

Den medfølgende dokumentation skal indeholde beskrivelser af, hvorledes den pågældende simuleringsmodel for enkeltanlæg kan anvendes ved eventuel efterfølgende aggregering til repræsentation af produktionsanlæggets egenskaber i nettilslutningspunktet samt eventuelle begrænsninger for anvendelsen af dette.

Simuleringsmodellen skal verificeres, som specificeret i **Afsnit 4**.

For asynkrone produktionsanlæg (Type C), hvor der anvendes eksterne komponenter, fx STATCOMs eller energilagringenheder m.m. eller hvor der anvendes site-specifikke funktioner for produktionsanlæggets kontrol-, beskyttelses-, og reguleringsfunktioner, herunder parkregulator, skal modelleverancen omfatte det samlede produktionsanlæg, jf. **Afsnit 2** og opfylde øvrige modeltekniske krav, jf. **Afsnit 3.2**.

### 2.2 Overordnet dokumentationskrav

For at sikre korrekt modelanvendelse, skal de påkrævede simuleringsmodeller dokumenteres i form af en brugervejledning med beskrivelser af modellernes strukturelle opbygning, samt beskrivelser af simuleringsmodellernes parametrisering og gyldige randbetingelser i form af arbejdspunkter og eventuelle restriktioner i relation til netforhold (kortslutningsforhold og R/X-forhold) i nettilslutningspunktet og i fejlstedet i forbindelse med simulering af eksterne hændelser i det kollektive elforsyningsnet. Ligeledes skal brugervejledningen indeholde oplysninger om særlige modeltekniske forhold, eksempelvis maxi-

<sup>1</sup> Den nødvendige modelopdatering omfatter kun de udskiftede anlægskomponenter eller systemer til kontrol, regulering eller anlægsbeskyttelse, idet det antages, at den systemansvarlige virksomhed i udgangspunktet har en gyldig simuleringsmodel for det pågældende produktionsanlæg. Hvor dette ikke er tilfældet, vil en væsentlig ændring af produktionsanlægget medføre krav om en komplet og fuld dokumenteret simuleringsmodel i henhold til denne modelkravspecifikation.

malt anvendelige tidsskridt for den anvendte ligningsløser i forbindelse med gennemførelse af dynamiske- og transiente simuleringer m.m.

Brugervejledningen skal desuden omfatte beskrivelser af de i simuleringsmodellen implementerede kontrol-, beskyttelses-, og reguleringsfunktioner til brug ved evaluering af produktionsanlæggets stationære- og dynamiske egenskaber i nettilslutningspunktet, hvor et særligt fokus skal rettes mod følgende forhold:

- Enstregdiagram med angivelse af simuleringsmodellens elektriske hovedkomponenter frem til nettilslutningspunktet.
- Beskrivelse af simuleringsmodellens elektriske indgangs- og udgangssignaler (elektriske terminaler), herunder relevante forhold i relationer til anvendte målepunkter, deres måleenheder og anvendte baseværdier for disse.
- En samlet parameterliste, hvor alle parameterværdier skal kunne genfindes i de medfølgende datablade for hovedkomponenter samt blokdiagrammer og overføringsfunktioner m.m.
- En samlet beskrivelse af aktiveringsniveauer for anvendte beskyttelsesfunktioner.
- Beskrivelse af hvorledes simuleringsmodellen kan integreres i en større net- og systemmodel som anvendt af den systemansvarlige virksomhed.
- Entydig versionsstyring af simuleringsmodellen og den tilhørende dokumentation.

Der henvises i øvrigt til de modelspecifikke dokumentationskrav, jf. de efterfølgende afsnit.

### 3. Modeltekniske krav

#### 3.1 Synkrone produktionsanlæg

##### 3.1.1 Krav til stationær simuleringsmodel (stationære forhold og kortslutningsforhold)

Simuleringsmodellen for det samlede produktionsanlæg skal repræsentere anlæggets stationære- og quasi-stationære egenskaber i nettilslutningspunktet, gældende for det definerede normaldriftsområde [1] og under alle relevante stationære netforhold, hvor produktionsanlægget skal kunne drives.

Quasi-stationære egenskaber omfatter i denne sammenhæng produktionsanlæggets egenskaber i forbindelse med en kortslutning i nettilslutningspunktet eller et vilkårligt sted i det kollektive elforsyningsnet. En kortslutning kan her antage form som:

- En fase-jord kortslutning med en vilkårlig impedans i fejlstedet.
- En to-faset kortslutning uden eller med jordberøring med en vilkårlig impedans i fejlstedet.
- En trefaset kortslutning med en vilkårlig impedans i fejlstedet.

Den stationære simuleringsmodel skal:

- Understøttes af modelbeskrivelser, der som minimum indeholder funktionsbeskrivelser af de overordnede moduler i modellen.
- Indeholde beskrivelser af de enkelte modelkomponenter og tilhørende parametre.
- Indeholde beskrivelser af opsætning af simuleringsmodellen samt eventuelle begrænsninger for anvendelsen af denne.
- Indeholde karakteristikker for produktionsanlæggets stationære driftsområder for aktiv- og reaktiv effekt, således simuleringsmodellen ikke fejlagtigt drives i et ugyldigt arbejds punkt.

- Muliggøre anvendelse af samtlige påkrævede reguleringsfunktioner for reaktiv effekt:
  - Effektfaktor-regulering ( $\cos \phi$ -regulering) med angivelse af referencepunktet.
  - Q-regulering (Mvar-regulering) med angivelse af referencepunktet,
  - Spændingsregulering inklusive parametre for anvendt droop/kompounding med angivelse af referencepunktet.
- Kunne benyttes til simulering af effektivværdier i de enkelte faser under symmetriske hændelser og fejl i det kollektive elforsyningsnet.
- Kunne benyttes til simulering af effektivværdier i de enkelte faser under usymmetriske hændelser og fejl i det kollektive elforsyningsnet.
- Som minimum kunne benyttes i frekvensområdet fra 47,5 Hz til 51,5 Hz og i spændingsområdet fra 0,0 pu til 1,4 pu.

Såfremt produktionsanlægget indeholder flere parallelle generatoranlæg, skal simuleringsmodellen kunne repræsentere produktionsanlæggets egenskaber i nettilslutningspunktet, jf. ovenstående. Simuleringsmodellens parametring skal indeholde komplette datasæt for hvert enkeltanlæg.

Simuleringsmodellen skal leveres implementeret i seneste udgave af simuleringsværktøjet DigSILENT PowerFactory ved anvendelse af de indbyggede netkomponentmodeller og standardprogrammeringsfunktioner, hvilket skal afspejles i den anvendte modelstruktur m.m. Den anvendte modelimplementering må ikke forudsætte anvendelse af særlige indstillinger for eller afvigelser fra standardindstillingerne for simuleringsværktøjets numeriske ligningsløser samt på anden måde forhindre integration mellem den af Anlægssejeren leverede simuleringsmodel og en større net- og systemmodel som anvendt af den systemansvarlige virksomhed.

Data for netkomponenter og øvrige dele, som indgår i anlægsinfrastrukturen, skal have et omfang og et detaljeringniveau, som muliggør opbygning af en komplet, fuldt funktionsdygtig simuleringsmodel, som krævet i **Afsnit 2**.

Såfremt den stationære simuleringsmodel er identisk med den i **Afsnit 3.1.2** beskrevne dynamiske simuleringsmodel bortfalder kravet om en separat stationær simuleringsmodel.

#### 3.1.1.1 Nøjagtighedskrav

Simuleringsmodellen må generelt ikke vise egenskaber, der ikke kan påvises for det fysiske produktionsanlæg.

#### 3.1.2 Krav til dynamisk simuleringsmodel (RMS-model)

Den dynamiske simuleringsmodel for det samlede produktionsanlæg (inklusive egetforbrugsanlæg) skal repræsentere anlæggets stationære- og dynamiske egenskaber i nettilslutningspunktet, gældende for det definerede normaldriftsområde [1] og under alle relevante netforhold, hvor produktionsanlægget skal kunne drives. Den dynamiske simuleringsmodel skal kunne repræsentere produktionsanlæggets stationære- og dynamiske egenskaber i forbindelse med setpunktsændringer for anlæggets produktion af reaktiv effekt, herunder ændring af reguleringsform for reaktiv effekt, samt nedenstående eksterne hændelser, eller kombinationer af disse eksterne hændelser i det kollektive elforsyningsnet:

- Generatornære fejl set fra nettilslutningspunktet i henhold til den påkrævede FRT-karakteristik, hvor en kortslutning her kan antage form som:
  - En fase-jord kortslutning med en vilkårlig impedans i fejlstedet.
  - En to-faset kortslutning uden eller med jordberøring med en vilkårlig impedans i fejlstedet.
  - En trefaset kortslutning med en vilkårlig impedans i fejlstedet.
- Udkobling af og mulig efterfølgende automatisk genindkobling af en vilkårlig fejlramt netkomponent i det kollektive elforsyningsnet, jf. ovenstående fejlforløb, og det afledte vektorspring i nettilslutningspunktet.
- Manuel ind- eller udkobling (uden forudgående fejl) af en vilkårlig netkomponent i det kollektive elforsyningsnet og det afledte vektorspring i nettilslutningspunktet.
- Spændingsforstyrrelser og tenderende spændingskollaps med en varighed indenfor den påkrævede minimumssimuleringstid, jf. nedenstående.
- Frekvensforstyrrelser med en varighed indenfor den påkrævede minimumssimuleringstid, jf. nedenstående.
- Aktivering af et pålagt systemværn (via et eksternt signal) til hurtig regulering af produktionsanlæggets aktive effektproduktion i henhold til en foruddefineret slutværdi og gradient.

Den dynamiske simuleringsmodel skal:

- Understøttes af modelbeskrivelser, der som minimum indeholder Laplace-domæne overføringsfunktioner, sekvensdiagrammer for anvendte *state-machines* samt funktionsbeskrivelser af anvendte aritmetiske, logiske og sekvensstyrede moduler i simuleringsmodellen.
- Indeholde beskrivelser og tilhørende parametre for de enkelte modelkomponenter, herunder mætning, ulinearitet, dødbånd, tidsforsinkelser samt begrænsningsfunktioner (wind-up/anti wind-up) samt look-up tabeldata og anvendte principper for interpolation m.m.
- Indeholde beskrivelser og entydige angivelser af simuleringsmodellens indgangs- og udgangssignaler, hvor dette som minimum skal omfatte følgende:
  - Aktiv effekt
  - Reaktiv effekt
  - Setpunkter for:
    - Aktiv effektregulering
    - Effektfaktor-regulering ( $\cos \phi$ -regulering)
    - Q-regulering (Mvar-regulering)
    - Spændingsregulering inklusive parametre for anvendt droop/komponering
    - Frekvensregulering
    - Systemværnsindgreb (slutværdi og gradient for regulering af aktiv effekt)
  - Signal for aktivering af systemværn
- Indeholde beskrivelser af opsætning og initialisering af simuleringsmodellen samt eventuelle begrænsninger for anvendelsen af denne.
- Indeholde samtlige påkrævede reguleringsfunktioner [1].
- Indeholde samtlige relevante beskyttelsesfunktioner, som kan aktiveres ved hændelser og fejl i det kollektive elforsyningsnet i blokdiagramformat med angivelse af overføringsfunktioner for de enkelte elementer.
- Indeholde magnetiseringssystemet, spændingsregulator, dæmpetilsats (PSS) og eventuel magnetiseringsmaskine repræsenteret i form af standardiserede modeller [2].

- Indeholde magnetiseringssystemets begrænserfunktioner (statorstrømsbegrænser, volt/hertz-begrænser samt over- og undermagnetiseringsbegrænser) i blokdiagramformat med angivelse af overføringsfunktioner for de enkelte elementer.
- Indeholde effekt- og hastighedsregulator, drivmaskine eller turbineanlæg repræsenteret i form af standardiserede modeller [3]. Såfremt det kan dokumenteres, at den påkrævede modelnøjagtighed ikke kan opnås med en standardiseret model, kan der efter aftale med den systemansvarlige virksom anvendes anlægsspecifikke modeller for disse anlægskomponenter.
- Indeholde en samlet mekanisk svingningsmassemodel for relevante anlægskomponenter (generatoranlæg, drivmaskine, turbineanlæg, gear, koblinger og magnetiseringsmaskine) inklusive dokumentation af inertikonstanter, egenfrekvenser samt fjeder- og dæmpningskonstanter for hvert af drivtogets masselementer.
- Kunne benyttes til simulering af effektivværdier (RMS) i de enkelte faser under symmetriske hændelser og fejl i det kollektive elforsyningsnet.
- Kunne benyttes til simulering af effektivværdier (RMS) i de enkelte faser under usymmetriske hændelser og fejl i det kollektive elforsyningsnet.
- Som minimum kunne benyttes i frekvensområdet fra 47,5 Hz til 51,5 Hz og i spændingsområdet fra 0,0 pu til 1,4 pu.
- Kunne eftervise krav til magnetiseringssystemets dynamiske respons, herunder krav til dæmpetilsats (PSS) med hensyn til dæmpning og fasekompensering [1].
- Kunne initialiseres i et stabilt arbejds punkt på baggrund af en enkelt loadflow simulering uden efterfølgende iterationer. Ved initialisering skal den afledte værdi ( $dx/dt$ ) for enhver af simuleringens modellens tilstandsvariable være mindre end 0,0001.
- Kunne beskrive produktionsanlæggets dynamiske egenskaber i mindst 60 sekunder efter enhver af ovenstående setpunktsændringer og eksterne hændelser i det kollektive elforsyningsnet.
- Være numerisk stabil ved gennemførelse af en *flat-run* simulering på minimum 60 sekunder, hvor de simulerede værdier for aktiv effekt, reaktiv effekt, spænding og frekvens skal forblive konstante under hele simuleringsforløbet.
- Kunne udnytte numeriske ligningsløserne med variabelt tidsskridt på mellem 1 og 10 ms.
- Være numerisk stabil ved et momentant spændingsspring på op til  $\pm 20^\circ$  i nettilslutningspunktet.
- Have en båndbredde på mindst 0,05 Hz til 10,0 Hz.
- Ikke indeholde krypterede- eller kompilerede dele (accepteres ikke), da den systemansvarlige virksomhed skal kunne kvalitetssikre resultaterne fra simuleringens modellen og vedligeholde denne uden begrænsninger ved softwareopdatering m.m.

Det accepteres, at simuleringens modellen i løbet af et gennemført simuleringens forløb giver enkelte fejlmeddelelser om manglende konvergens i forbindelse med påtrykte dynamiske hændelser. Dette vil dog i udgangspunktet blive opfattet som modelimplementeringsmæssig imperfektion, hvor årsagen og forslag til afhjælpning af dette skal fremgå af den tilhørende modeldokumentation. Såfremt det kan dokumenteres, at simuleringens modellens konvergensmæssige forhold har negativ indvirkning på anvendelsen af den systemansvarlige virksomheds samlede net- og systemmodel, vil den pågældende simuleringens model blive afvist.

Såfremt produktionsanlægget indeholder flere parallelle generatoranlæg, skal simuleringens modellen kunne repræsentere produktionsanlæggets egenskaber i nettilslutningspunktet, jf. ovenstående. Simuleringens modellens parametring skal indeholde komplette datasæt for hvert enkeltanlæg.



Såfremt dele af simuleringsmodellens parametersæt ikke kan genfindes direkte ud fra det tilsvarende og påkrævede parameterudtræk fra produktionsanlæggets kontrol-, beskyttelses- og reguleringsudstyr, skal modeldokumentationen indeholde beskrivelser af de til simuleringsmodellen gennemførte parametreomregninger samt forudsætningerne herfor.

Simuleringsmodellen skal leveres implementeret i seneste udgave af simuleringsværktøjet DIgSILENT PowerFactory ved anvendelse af de indbyggede netkomponentmodeller og standardprogrammeringsfunktioner, hvilket skal afspejles i den anvendte modelstruktur m.m. Den anvendte modelimplementering må ikke forudsætte anvendelse af særlige indstillinger for eller afvigelser fra standardindstillingerne for simuleringsværktøjets numeriske ligningsløser samt på anden måde forhindre integration mellem den af Anlægssejeren leverede simuleringsmodel og en større net- og systemmodel som anvendt af den systemansvarlige virksomhed.

For at sikre en entydig modelimplementering skal simuleringsmodellens baseværdier for generatorfeltstrøm og generatorfeltspænding angives i henhold til The *Non-reciprocal* per unit systemet [4], hvilket skal anvendes som baseværdi for simuleringsmodellens øvrige delmodeller, fx spændingsregulator og begrænserfunktioner m.m.

Såfremt produktionsanlægget indeholder hovedkomponenter, fx effekt- og hastighedsregulator, drivmaskine eller turbineanlæg, hvor modeldannelsen af disse kræver parametertilpasninger som funktion af produktionsanlæggets aktuelle arbejds punkt af hensyn til den påkrævede modelnøjagtighed, skal modeldokumentationen, jf. ovenstående, indeholde nødvendige modelparametersæt for hvert af nedenstående arbejds punkter:

- 25 % af nominel aktiv effektproduktion.
- 50 % af nominel aktiv effektproduktion.
- 75 % af nominel aktiv effektproduktion.
- 100 % af nominel aktiv effektproduktion.

Data for netkomponenter og øvrige dele, som indgår i anlægsinfrastrukturen, skal have et omfang og et detaljeringsniveau, som muliggør opbygning af en komplet, fuldt funktionsdygtig simuleringsmodel, som krævet i **Afsnit 2**.

Simuleringsmodellen skal verificeres, som specificeret i **Afsnit 4**.

#### 3.1.2.1 Nøjagtighedskrav

Simuleringsmodellen skal repræsentere produktionsanlæggets stationære- og dynamiske egenskaber i nettilslutningspunktet. Simuleringsmodellen skal således reagere tilstrækkeligt nøjagtigt i forhold til det fysiske anlægs stationære svar for et gyldigt stationært arbejds punkt og tilsvarende for det dynamiske svar i forbindelse med en setpunktsændring eller en ekstern hændelse i det kollektive elforsyningsnet.

Anlægssejeren skal sikre, at simuleringsmodellerne er verificeret med resultaterne af de definerede overensstemmelsesprøvninger [1] samt relevante test- og valideringsstander og fremsende den nødvendige dokumentation herfor. **Afsnit 4.1.2** beskriver den påkrævede valideringsprocedure.

For at sikre en objektiv vurdering af simuleringsmodellens nøjagtighed, skal følgende kvalitative krav være opfyldte. Det skal bemærkes, at samtlige kriterier gælder, og at intet kriterium kan tilsidesætte et

andet. **Bilag 1** viser hvilke af produktionsanlæggets elektriske signaler, der er omfattet af nedenstående nøjagtighedskrav.

For magnetiseringssystemet og dæmpetilsats (PSS) skal frekvensresponsen inden for en båndbredde på mindst 0,1-5 Hz være inden for følgende tolerancer:

- (a) Afvigelsen mellem den simulerede amplitude og den tilsvarende målte amplitude skal være mindre end 10 % for en vilkårlig frekvens inden for den definerede båndbredde.
- (b) Afvigelsen mellem den simulerede fasevinkel og den tilsvarende målte fasevinkel skal være mindre end 5 grader for en vilkårlig frekvens inden for den definerede båndbredde.

Gældende for produktionsanlæggets dynamiske egenskaber (tidsdomæne fænomener) foranlediget af fx setpunktsændringer for anlæggets produktion af aktiv- og reaktiv effekt, herunder ændring af reguleringsform for aktiv- og reaktiv effekt, samt eksterne hændelser i det kollektive elforsyningsnet, skal simuleringsmodellens tilsvarende svar opfylde nedenstående nøjagtighedskrav:

1. Afvigelser i simulerede gradienter ( $dx/dt$ ) sammenlignet med tilsvarende målte gradienter skal være inden for følgende tolerance:
  - (a) 10 % afvigelse i amplitude.
  - (b) Tidsforskydning (positiv eller negativ) for gradientens starttidspunkt eller sluttidspunkt skal være mindre end 20 millisekunder.
2. Produktionsanlæggets simulerede svar må ikke indeholde momentane ændringer af amplituden i form af positive eller negative "spikes" på mere end 10 % af den tilsvarende målte værdi. Såfremt der opstår momentane amplitudeændringer over det tilladte niveau, og hvor dette alene kan tilskrives numeriske forhold grundet det anvendte simuleringsværktøj, skal dette forhold dokumenteres i den påkrævede modelvalideringsrapport.
3. Simulerede quasi-stationære oscillationer inden for frekvensområdet 0,1-5 Hz i produktionsanlæggets aktive- og reaktive effektproduktion samt spænding i forbindelse med en setpunktsændring eller en ekstern hændelse i det kollektive elforsyningsnet, skal være dæmpede, og frekvensafvigelsen skal være mindre end 10 % af den tilsvarende målte værdi.
4. Under hensyntagen til eventuel forskel i målt og simuleret spænding i nettilslutningspunktet skal afvigelsen i produktionsanlæggets simulerede aktive- og reaktive effektproduktion, til enhver tid under simuleringen, være mindre end 10 % af den tilsvarende målte værdi i forbindelse med en setpunktsændring eller en ekstern hændelse i det kollektive elforsyningsnet.
5. Under hensyntagen til eventuel forskel i målt og simuleret spænding i nettilslutningspunktet skal afvigelsen i produktionsanlæggets simulerede stationære aktive- og reaktive effektproduktion være mindre end 2 % af den tilsvarende målte værdi i forbindelse med en setpunktsændring eller en ekstern hændelse i det kollektive elforsyningsnet.

Simuleringsmodellen må generelt ikke vise egenskaber, der ikke kan påvises for det fysiske produktionsanlæg.

### 3.1.3 Krav til transient simuleringsmodel (EMT-model)

Ikke påkrævet.

### 3.1.4 Krav til harmonisk simuleringsmodel

Ikke påkrævet.

## 3.2 Asynkrone produktionsanlæg

### 3.2.1 Krav til stationær simuleringsmodel (stationære forhold og kortslutningsforhold)

Simuleringsmodellen for det samlede produktionsanlæg skal repræsentere anlæggets stationære- og quasi-stationære egenskaber i nettilslutningspunktet, gældende for det definerede normaldriftsområde [1] og under alle relevante stationære netforhold, hvor produktionsanlægget skal kunne drives.

Quasi-stationære egenskaber omfatter i denne sammenhæng produktionsanlæggets egenskaber i forbindelse med en kortslutning i nettilslutningspunktet eller et vilkårligt sted i det kollektive elforsyningsnet. En kortslutning kan her antage form som:

- En fase-jord kortslutning med en vilkårlig impedans i fejlstedet.
- En to-faset kortslutning uden eller med jordberøring med en vilkårlig impedans i fejlstedet.
- En trefaset kortslutning med en vilkårlig impedans i fejlstedet.

Den stationære simuleringsmodel skal:

- Understøttes af modelbeskrivelser, der som minimum indeholder funktionsbeskrivelser af de overordnede moduler i modellen.
- Indeholde beskrivelser af de enkelte modelkomponenter og tilhørende parametre.
- Indeholde beskrivelser af opsætning af simuleringsmodellen samt eventuelle begrænsninger for anvendelsen af denne.
- Indeholde karakteristikker for produktionsanlæggets stationære driftsområder for aktiv- og reaktiv effekt, således simuleringsmodellen ikke fejlagtigt drives i et ugyldigt arbejds punkt.
- Muliggøre anvendelse af samtlige påkrævede reguleringsfunktioner for reaktiv effekt:
  - Effektfaktor-regulering ( $\cos \phi$ -regulering) med angivelse af referencepunktet.
  - Q-regulering (Mvar-regulering) med angivelse af referencepunktet.
  - Spændingsregulering inklusive parametre for anvendt droop/kompondering med angivelse af referencepunktet.
- Kunne benyttes til simulering af effektivværdier i de enkelte faser under symmetriske hændelser og fejl i det kollektive elforsyningsnet.
- Kunne benyttes til simulering af effektivværdier i de enkelte faser under usymmetriske hændelser og fejl i det kollektive elforsyningsnet.
- Som minimum kunne benyttes i frekvensområdet fra 47,5 Hz til 51,5 Hz og i spændingsområdet fra 0,0 pu til 1,4 pu.

Såfremt simuleringsmodellen anvendes til aggregering af enkeltanlæg til en samlet repræsentation af produktionsanlægget i nettilslutningspunktet, skal modellen kunne repræsentere produktionsanlæggets egenskaber i nettilslutningspunktet, jf. ovenstående. Den medfølgende dokumentation skal indeholde beskrivelser af de anvendte principper for aggregering samt eventuelle begrænsninger for anvendelsen af dette. Simuleringsmodellens parametring skal indeholde komplette datasæt for enkeltanlæg og det aggregerede anlæg.

Simuleringsmodellen skal leveres implementeret i seneste udgave af simuleringsværktøjet DlgSILENT PowerFactory ved anvendelse af de indbyggede netkomponentmodeller og standardprogrammeringsfunktioner, hvilket skal afspejles i den anvendte modelstruktur m.m. Den anvendte modelimplementering må ikke forudsætte anvendelse af særlige indstillinger for eller afvigelser fra standardindstillingerne for simuleringsværktøjets numeriske ligningsløser samt på anden måde forhindre integration mellem

den af Anlægsejeren leverede simuleringsmodel og en større net- og systemmodel som anvendt af den systemansvarlige virksomhed.

Simuleringsmodellen for parkregulatoren og simuleringsmodellen for det enkelte produktionsanlæg skal have et indhold og et detaljeringsniveau, så de uden videre kan integreres i en større net- og systemmodel som anvendt af den systemansvarlige virksomhed og efterfølgende fremstå som en komplet, fuldt funktionsdygtig simuleringsmodel, som krævet i **Afsnit 2**.

Data for netkomponenter og øvrige dele, som indgår i anlægsinfrastrukturen, skal have et omfang og et detaljeringsniveau, som muliggør opbygning af en komplet, fuldt funktionsdygtig simuleringsmodel, som krævet i **Afsnit 2**.

Såfremt den stationære simuleringsmodel er identisk med den i **Afsnit 3.2.2** beskrevne dynamiske simuleringsmodel bortfalder kravet om en separat stationær simuleringsmodel.

### 3.2.1.1 Nøjagtighedskrav

Simuleringsmodellen må generelt ikke vise egenskaber, der ikke kan påvises for det fysiske produktionsanlæg.

### 3.2.2 Krav til dynamisk simuleringsmodel (RMS-model)

Den dynamiske simuleringsmodel for det samlede produktionsanlæg skal repræsentere anlæggets stationære- og dynamiske egenskaber i nettilslutningspunktet, gældende for det definerede normaldriftsområde [1] og under alle relevante netforhold, hvor produktionsanlægget skal kunne drives. Den dynamiske simuleringsmodel skal kunne repræsentere produktionsanlæggets stationære- og dynamiske egenskaber i forbindelse med setpunktsændringer for anlæggets produktion af aktiv- og reaktiv effekt, herunder ændring af reguleringsform for dette, samt nedenstående eksterne hændelser, eller kombinationer af disse eksterne hændelser i det kollektive elforsyningsnet:

- Generatornære fejl set fra nettilslutningspunktet i henhold til den påkrævede FRT-karakteristik, hvor en kortslutning her kan antage form som:
  - En fase-jord kortslutning med en vilkårlig impedans i fejlstedet.
  - En to-faset kortslutning uden eller med jordberøring med en vilkårlig impedans i fejlstedet.
  - En trefaset kortslutning med en vilkårlig impedans i fejlstedet.
- Udkobling af og mulig efterfølgende automatisk genindkobling af en vilkårlig fejlramt netkomponent i det kollektive elforsyningsnet, jf. ovenstående fejlforløb, og det afledte vektorspring i nettilslutningspunktet.
- Manuel ind- eller udkobling (uden forudgående fejl) af en vilkårlig netkomponent i det kollektive elforsyningsnet og det afledte vektorspring i nettilslutningspunktet.
- Spændingsforstyrrelser og tenderende spændingskollaps med en varighed indenfor den påkrævede minimumssimuleringsperiode, jf. nedenstående.
- Frekvensforstyrrelser med en varighed indenfor den påkrævede minimumssimuleringsperiode, jf. nedenstående.
- Aktivering af et pålagt systemværn (via et eksternt signal) til hurtig regulering af produktionsanlæggets aktive effektproduktion i henhold til en foruddefineret slutværdi og gradient.

Den dynamiske simuleringsmodel skal:

- Understøttes af modelbeskrivelser, der som minimum indeholder Laplace-domæne overføringsfunktioner, sekvensdiagrammer for anvendte *state-machines* samt funktionsbeskrivelser af anvendte aritmetiske, logiske og sekvensstyrede moduler i simuleringsmodellen.
- Indeholde beskrivelser og tilhørende parametre for de enkelte modelkomponenter, herunder mætning, ulinearitet, dødbånd, tidsforsinkelser samt begrænsningsfunktioner (wind-up/anti wind-up) samt look-up tabeldata og anvendte principper for interpolation m.m.
- Indeholde beskrivelser og entydige angivelser af simuleringsmodellens indgangs- og udgangssignaler, hvor dette som minimum skal omfatte følgende:
  - Aktiv effekt.
  - Reaktiv effekt.
  - Setpunkter for:
    - Aktiv effektregulering.
    - Effektfaktor-regulering ( $\cos \phi$ -regulering).
    - Q-regulering (Mvar-regulering).
    - Spændingsregulering inklusive parametre for anvendt droop/kompounding.
    - Frekvensregulering.
    - Systemværnsindgreb (slutværdi og gradient for regulering af aktiv effekt).
  - Signal for aktivering af systemværn.
  - Styresignaler for eventuelle eksterne netkomponenter, fx STATCOMs eller energilagringenheder m.m.
- Indeholde beskrivelser af opsætning og initialisering af simuleringsmodellen samt eventuelle begrænsninger for anvendelsen af denne.
- Indeholde samtlige påkrævede reguleringsfunktioner [1].
- Indeholde samtlige relevante beskyttelsesfunktioner, som kan aktiveres ved hændelser og fejl i det kollektive elforsyningsnet i blokdiagramformat med angivelse af overføringsfunktioner for de enkelte elementer.
- Indeholde samtlige kontrolfunktioner<sup>2</sup>, som kan aktiveres ved alle relevante hændelser og fejl i det kollektive elforsyningsnet.
- Indeholde produktionsanlæggets effekt- og hastighedsregulator
- Indeholde en samlet mekanisk svingningsmassemodel for produktionsanlæggets drivtøj inklusive dokumentation af inertikonstanter, egenfrekvenser samt fjeder- og dæmpningskonstanter, såfremt dette er relevant til repræsentationen af produktionsanlæggets stationære- og dynamiske egenskaber.
- Kunne benyttes til simulering af effektivværdier (RMS) i de enkelte faser under symmetriske hændelser og fejl i det kollektive elforsyningsnet.
- Kunne benyttes til simulering af effektivværdier (RMS) i de enkelte faser under usymmetriske hændelser og fejl i det kollektive elforsyningsnet.
- Som minimum kunne benyttes i frekvensområdet fra 47,5 Hz til 51,5 Hz og i spændingsområdet fra 0,0 pu til 1,4 pu.

<sup>2</sup> Kontrolfunktioner i relation til produktionsanlæggets pålagte *fault-ride through* egenskaber, herunder dynamisk spændingsstøtte i forbindelse med et spændingsdyk.

- Kunne initialiseres i et stabilt arbejds punkt på baggrund af en enkelt loadflow simulering uden efterfølgende iterationer. Ved initialisering skal den afledte værdi ( $dx/dt$ ) for enhver af simuleringsmodellens tilstandsvariable være mindre end 0,0001.
- Kunne beskrive produktionsanlæggets dynamiske egenskaber i mindst 60 sekunder efter enhver af ovenstående setpunktsændringer og eksterne hændelser i det kollektive elforsyningsnet.
- Være numerisk stabil ved gennemførelse af en *flat-run* simulering på minimum 60 sekunder, hvor de simulerede værdier for aktiv effekt, reaktiv effekt, spænding og frekvens skal forblive konstante under hele simuleringsforløbet.
- Kunne udnytte numeriske ligningsløserne med variabelt tidsskridt på mellem 1 og 10 ms.
- Være numerisk stabil ved et momentant spændingsspring på op til  $\pm 20^\circ$  i nettilslutningspunktet.
- Have en båndbredde på mindst 0,05 Hz til 10,0 Hz.
- Ikke indeholde krypterede- eller kompilerede dele (accepteres ikke), da den systemansvarlige virksomhed skal kunne kvalitetssikre resultaterne fra simuleringsmodellen og vedligeholde denne uden begrænsninger ved softwareopdatering m.m.

Det accepteres, at simuleringsmodellen i løbet af et gennemført simuleringsforløb giver enkelte fejlmeddelelser om manglende konvergens i forbindelse med påtrykte dynamiske hændelser. Dette vil dog i udgangspunktet blive opfattet som modelimplementeringsmæssig imperfektion, hvor årsagen og forslag til afhjælpning af dette skal fremgå af den tilhørende modeldokumentation. Såfremt det kan dokumenteres, at simuleringsmodellens konvergensmæssige forhold har negativ indvirkning på anvendelsen af den systemansvarlige virksomheds samlede net- og systemmodel, vil den pågældende simuleringsmodel blive afvist.

Såfremt simuleringsmodellen anvendes til aggregering af enkeltanlæg til en samlet repræsentation af produktionsanlægget i nettilslutningspunktet, skal modellen kunne repræsentere produktionsanlæggets egenskaber i nettilslutningspunktet, jf. ovenstående. Den medfølgende dokumentation skal indeholde beskrivelser af de anvendte principper for aggregering samt eventuelle begrænsninger for anvendelsen af dette. Simuleringsmodellens parametring skal indeholde komplette datasæt for enkeltanlæg og det aggregerede anlæg.

Såfremt produktionsanlægget indeholder eksterne komponenter, fx af hensyn til overholdelse af nettilslutningskravene eller til levering af kommercielle systemydelser, skal simuleringsmodellen indeholde den nødvendige repræsentation af disse komponenter som krævet i **Afsnit 2**.

Simuleringsmodellen for parkregulatoren og simuleringsmodellen for det enkelte produktionsanlæg skal have et indhold og et detaljeringniveau, så de uden videre kan integreres i en større net- og systemmodel som anvendt af den systemansvarlige virksomhed og efterfølgende fremstå som en komplet, fuldt funktionsdygtig simuleringsmodel, som krævet i **Afsnit 2**.

Simuleringsmodellen skal leveres implementeret i seneste udgave af simuleringsværktøjet DiGSILENT PowerFactory ved anvendelse af de indbyggede netkomponentmodeller og standardprogrammeringsfunktioner, hvilket skal afspejles i den anvendte modelstruktur m.m. Den anvendte modelimplementering må ikke forudsætte anvendelse af særlige indstillinger for eller afvigelser fra standardindstillingerne for simuleringsværktøjets numeriske ligningsløser samt på anden måde forhindre integration mellem

den af Anlægssejeren leverede simuleringsmodel og en større net- og systemmodel som anvendt af den systemansvarlige virksomhed.

Data for netkomponenter og øvrige dele, som indgår i anlægsinfrastrukturen, skal have et omfang og et detaljeringsniveau, som muliggør opbygning af en komplet, fuldt funktionsdygtig simuleringsmodel, som krævet i **Afsnit 2**.

Simuleringsmodellen skal verificeres, som specificeret i **Afsnit 4**.

### 3.2.2.1 Nøjagtighedskrav

Simuleringsmodellen skal repræsentere produktionsanlæggets stationære- og dynamiske egenskaber i nettilslutningspunktet. Simuleringsmodellen skal således reagere tilstrækkeligt nøjagtigt i forhold til det fysiske anlægs stationære svar for et gyldigt stationært arbejds punkt og tilsvarende for det dynamiske svar i forbindelse med en setpunktsændring eller en ekstern hændelse i det kollektive elforsyningsnet.

Anlægssejeren skal sikre, at simuleringsmodellerne er verificeret med resultaterne af de påkrævede overensstemmelsesprøvninger [1] samt relevante test- og valideringsstandarder [5, 6] og fremsende den nødvendige dokumentation herfor. **Afsnit 4.1.2** beskriver den påkrævede valideringsprocedure.

Eftersom modelvalideringen omfatter produktionsanlæggets stationære- og dynamiske egenskaber i forbindelse med eksterne hændelser i det kollektive elforsyningsnet, og tilsvarende i forbindelse med setpunktsændringer for anlæggets produktion af aktiv- og reaktiv effekt, er det hensigtsmæssigt, at definere nøjagtighedskrav, og behandle valideringsproceduren for disse forhold separat som beskrevet i de efterfølgende afsnit.

#### 3.2.2.1.1 Nøjagtighedskrav i forbindelse med eksterne hændelser i det kollektive elforsyningsnet

Begrebet *eksterne hændelser* omfatter i denne sammenhæng momentane spændingsændringer målt i produktionsanlæggets nettilslutningspunktet, fx i forbindelse med kortslutning af en netkomponent eller i forbindelse med manuel kobling med en netkomponent i det kollektive elforsyningsnet. Test og validering af et produktionsanlægs stationære- og dynamiske egenskaber i forbindelse med sådanne eksterne hændelser gennemføres typisk kun i sammenhæng med certificering og typegodkendelse af det pågældende produktionsanlæg. Disse standardtest gennemføres normalt for et enkeltanlæg, hvor en veldefineret spændingsprofil påtrykkes anlægget, typisk på højspændingssiden af den anvendte maskintransformer.

Det primære formål med disse standardtest er verifikation og certificering af produktionsanlæggets overholdelse af de påkrævede FRT-egenskaber [1], herunder krav om levering af dynamisk spændingsstøtte (reaktiv tillægsstrøm  $I_Q$ ) under fejlforløbet i henhold til den definerede karakteristik. Resultaterne af disse standardtest anvendes ved den efterfølgende verifikation af de opstillede funktionskrav til og nøjagtigheden af den påkrævede simuleringsmodel.

De til modelvalideringen anvendte standardtest skal gennemføres og dokumenteres i henhold til definitioner og beskrivelser givet ved [6].



Modelvalideringen er baseret på evaluering af simuleringsmodellens statistiske nøjagtighed, hvor nøjagtigheden fastlægges på baggrund af beregning af afvigelsen i modellens simulerede svar i forhold til den tilsvarende målte værdi, hvormed afvigelsen defineres som:  $X_E(n) = X_{sim}(n) - X_{m\ddot{a}lt}(n)$ . Den beregnede afvigelse evalueres ved anvendelse af nedenstående statistiske kriterier defineret i [6].

- MXE - Den maksimale afvigelse (The maximum error)
- ME – Den gennemsnitlige afvigelse (The mean error)
- MAE – Den gennemsnitlige (absolutte) afvigelse (The mean absolute error)

Simuleringsmodellen evalueres på baggrund af følgende signaler:

- Aktiv effekt
- Reaktiv effekt
- Strøm (aktiv komponent)
- Strøm (reaktiv komponent)

For at sikre en objektiv vurdering af simuleringsmodellens nøjagtighed, skal følgende kvalitative krav være opfyldte for hver af de gennemførte standardtest, idet de for modellen beregnede afvigelser skal være mindre end eller lig med de i **Tabel 2** angivne tilladelige afvigelser.

		Synkron- og inverterkomponenter											
		Aktiv effekt			Reaktiv effekt			Strøm (aktiv komponent)			Strøm (reaktiv komponent)		
		MXE	ME	MAE	MXE	ME	MAE	MXE	ME	MAE	MXE	ME	MAE
Tilladelig afvigelse	Pre-fault	0,150	±0,100	0,120	0,150	±0,100	0,120	0,150	±0,100	0,120	0,150	±0,100	0,120
	Fault	0,170	±0,150	0,170	0,170	±0,150	0,170	0,500	±0,300	0,400	0,170	±0,150	0,170
	Post-fault	0,170	±0,150	0,170	0,170	±0,150	0,170	0,170	±0,150	0,170	0,170	±0,150	0,170

Tabel 2 Nøjagtighedskrav - tilladelige afvigelse

Nøjagtighedskravet til den påkrævede simuleringsmodel betragtes som værende opfyldt, såfremt samtlig af de definerede tolerancer i forhold til tilladelig afvigelse er opfyldt.

Simuleringsmodellen må generelt ikke vise egenskaber, der ikke kan påvises for det fysiske produktionsanlæg.

### 3.2.2.1.2 Nøjagtighedskrav i forbindelse med ændringer af produktionsanlæggets arbejds punkt

Begrebet *ændringer af produktionsanlæggets arbejds punkt* omfatter i denne sammenhæng manuelle ændringer af produktionsanlæggets stationære arbejds punkt, fx i forbindelse med en setpunktændring for produktion af aktiv effekt eller tilsvarende ændring af setpunktet for de øvrige påkrævede reguleringsfunktioner [1]. Test og validering af et produktionsanlæggs stationære- og dynamiske egenskaber i forbindelse med sådanne setpunktændringer gennemføres typisk i sammenhæng med de påkrævede overensstemmelsesprøvninger.

Det primære formål med disse standardtest er verifikation af produktionsanlæggets overholdelse af de påkrævede stationære- og dynamiske egenskaber i nettilslutningspunktet, herunder overholdelse af de definerede krav i forhold til fx reaktionstid og reguleringsgradienter, aktiveringsniveauer for regulerings- og begrænsningsfunktioner samt verifikation af produktionsanlæggets arbejdsområde m.m.

Resultaterne af disse standardtest anvendes ved den efterfølgende verifikation af de opstillede funktionskrav til og nøjagtigheden af den påkrævede simuleringsmodel.

De til modelvalideringen anvendte standardtest skal gennemføres og dokumenteres i henhold til definitioner og beskrivelser givet ved [6].

Som minimum skal følgende af simuleringsmodellens reguleringsfunktioner inkluderes i modelverifikationen:

- Aktiv effektregulering
- Reaktiv effektregulering
  - Effektfaktor-regulering ( $\cos \phi$ -regulering)
  - Q-regulering (Mvar-regulering)
- Spændingsregulering (spændingsreferencepunkt i nettilslutningspunktet)
- Frekvensregulering
- Systemværnsindgreb (slutværdi og gradient for nedregulering af aktiv effekt) – hvis pålagt

Simuleringsmodellens nøjagtighed i forhold til de påkrævede reguleringsfunktioner skal verificeres på baggrund af beregning af afvigelsen i modellens simulerede svar i forhold til den tilsvarende målte værdi.

For at sikre en objektiv vurdering af simuleringsmodellens nøjagtighed, skal følgende kvalitative krav gældende for produktionsanlæggets steprespons være opfyldte for hver af de gennemførte standardtest, idet de for modellen beregnede afvigelser skal være mindre end eller lig med de i **Tabel 3** angivne tilladelige afvigelser.

	Rise time	Reaction time	Settling time	Overshoot	Steady state
	$X_E = X_{sim} - X_{m\ddot{a}lt}$	$X_E = X_{sim} - X_{m\ddot{a}lt}$	$X_E = X_{sim} - X_{m\ddot{a}lt}$	$X_E = X_{sim} - X_{m\ddot{a}lt}$	$X_E = X_{sim} - X_{m\ddot{a}lt}$
<b>Tilladelig afvigelse</b>	<b>&lt; 20 ms</b>	<b>&lt; 20 ms</b>	<b>&lt; 20 ms</b>	<b>&lt; 10 %</b>	<b>&lt; <math>\pm 2</math> % af <math>P_{nominal}</math></b>

Tabel 3 Nøjagtighedskrav - tilladelige afvigelse

Ved beregning af *settling time* tillades et tolerancebånd (*tolerance band*) på  $\pm 10$  % af det stationære svar [6].

**Bilag 1** viser hvilke af produktionsanlæggets elektriske signaler, der er omfattet af ovenstående nøjagtighedskrav.

Simuleringsmodellen må generelt ikke vise egenskaber, der ikke kan påvises for det fysiske produktionsanlæg.

### 3.2.3 Krav til transient simuleringsmodel (EMT-model)

Anlægssejer har til ansvar at levere en elektromagnetisk-transient simuleringsmodel (EMT-model) af produktionsanlægget til den systemansvarlige virksomhed i henhold til nedenstående specifikation:

- EMT-modellen skal udvikles og leveres til PSCAD/EMTDC i softwareversionen fastsat af den systemansvarlige virksomhed
- Hvis produktionsanlægget består af flere identiske produktionsenheder, skal EMT-modellen kunne repræsentere den enkelte produktionsenhed såvel som et valgfrit antal af enheder for modelaggregering.
- EMT-modellen må indeholde prækompilerede og krypterede dele. EMT modellen skal være DLL-baseret og kunne benyttes med Intel Fortran fra version 12 til og med senest udgivne på datoen for kontraktunderskrivning mellem Anlægssejer og producenten af produktionsenheden. Afhængelighed af PSCAD versionsopdatering accepteres, under forudsætning af at EMT-modellen benytter standardkomponenter, der er tilgængelige for brugeren.
- Simuleringstidspunkt for påbegyndelse af EMT-modellens injektion af tilsyneladende effekt skal kunne indstilles af brugeren.
- Simuleringstidspunkt for aktivering af produktionsanlæggets beskyttelsessystemer i EMT-modellen skal kunne indstilles af brugeren.
- EMT-modellen skal valideres for simuleringer ved forskellige simuleringstidskridt. Modellen skal give tilnærmelsesvis samme resultater ved transiente simuleringer med ethvert tidsskridt i det gyldige interval. Højeste mulige tidsskridt skal angives i brugervejledningen.
- EMT-modellen skal kunne optræde funktionelt flere gange i samme PSCAD simuleringsfil, uden at dette leder til at væsentlige ændringer skal foretages. Derfor skal EMT-modellen kunne indgå som adskillige "definitions" eller adskillige "instances". Hvis modellen indeholder et alternativ til brug af adskillige "definition" eller "instance" skal dette beskrives i brugervejledningen.
- EMT-modellen skal understøtte brug af PSCAD/EMTDCs "snapshot" funktion. Det påkræves, at modellen viser samme svar med og uden brug af snapshot funktionen. Modellen skal kunne initialiseres på maksimalt 3 sekunds simuleringstid.
- EMT-modellen skal repræsentere alle komponenter, reguleringssystemer og beskyttelsessystemer relevante for EMT analyser.
- Alle for EMT analyser relevante funktionsindstillinger i produktionsanlæggets reguleringssystem, der kan ændres enten lokalt eller ved fjernkontrol, skal være tilgængelige parametre i simuleringsmodellen. Omfanget af leverancen godkendes af den systemansvarlige virksomhed.
- Alle elektriske, mekaniske, regulerings og beskyttelsessignaler relevante for EMT analyser af det kollektive elforsyningsnet skal være tilgængelige i EMT-modellen. Omfanget af leverancen godkendes af den systemansvarlige virksomhed.
- Netkomponenter og øvrige dele, som indgår i anlægsinfrastrukturen, skal implementeres i EMT-modellen i et omfang og et detaljeringniveau, der er gyldig for EMT studier. Dette inkluderer opsamlingskabler, transformere, filtre m.m. Omfanget af leverancen godkendes af den systemansvarlige virksomhed.
- For produktionsenheder med mekanisk drivtøj skal EMT-modellen indeholde en mekanisk svingningsmassemode for produktionsanlæggets drivtøj inklusive dokumentation af inertikonstanter, egenfrekvenser samt fjeder- og dæmpningskonstanter, såfremt det er relevant for den elektriske performance.
- For produktionsenheder med en nettilsluttet konverter skal denne modelleres på transistor niveau for korrekt repræsentation ved transiente studier.
- EMT-modellen skal repræsentere produktionsenhedens FRT egenskaber [1].

- Hvis produktionsanlægget har særlige funktioner, som eksempel et reguleringsmode for særligt svagt net, skal disse funktioner inkluderes i EMT-modellen. En relevant modelteknisk beskrivelse af de særlige funktioner og disses begrænsninger skal inkluderes i EMT-model brugervejledningen..
- Modellen skal være gyldig for stationære driftsforhold
- EMT-modellen skal være anvendelig for EMT simuleringer af balancerede samt ubalancerede fejl og afbrydelse af produktionsanlæggets forbindelse til det kollektive elforsyningsnet.

EMT-modellen skal valideres ift. målinger af produktionsenhedens stationære- og dynamiske egenskaber i forbindelse med setpunktsændringer for anlæggets produktion af aktiv- og reaktiv effekt, herunder ændring af reguleringsform for dette, samt nedenstående eksterne hændelser, eller kombinationer af disse eksterne hændelser i det kollektive elforsyningsnet:

- Generatornære fejl set fra nettilslutningspunktet i henhold til den påkrævede FRT-karakteristik, hvor en kortslutning her kan antage form som:
  - En fase-jord kortslutning med en vilkårlig impedans i fejlstedet.
  - En to-faset kortslutning uden eller med jordberøring med en vilkårlig impedans i fejlstedet.
  - En trefaset kortslutning med en vilkårlig impedans i fejlstedet.
- En spændingsforstyrrelse af kortere eller længere varighed tenderende et spændingskollaps.

### 3.2.3.1 Modelleverance

EMT-modellen skal ved levering bestå af følgende

- PSCAD/EMTDC simuleringsmodel
- Brugervejledning med beskrivelse af modelbegrænsninger
- Valideringsrapport for EMT-modellen
- En funktionel PSCAD simuleringsmodel skal leveres for produktionsanlægget forbundet til en simpel modelrepræsentation af det kollektive elforsyningsnet, f.eks. en Thévenin ækvivalent model.
- Brugervejledningen skal beskrive modelantagelser og anvendelse af EMT-modellen.
- En detaljeret beskrivelse af modelbegrænsninger skal leveres, med beskrivelse af alle produktionsanlæggets funktioner, der ikke er inkluderet i EMT-modellen, som ville kunne antages at have betydning for produktionsanlæggets transiente elektriske egenskaber og performance.
- Valideringsrapporten for EMT-modellen skal indeholde sammenligning af PSCAD/EMTDC modellens stationære- og dynamiske respons med målinger foretaget på den virkelige produktionsenhed.

### 3.2.3.2 Nøjagtighedskrav

Nøjagtigheden af den påkrævede EMT-simuleringsmodel fastlægges på samme måde som RMS-modellen ved anvendelse af passende filtrering til beregning af 50 Hz komponenten af måle- og simulerede værdier. Metoden anvendt til filtrering aftales mellem Anlægssejer og den systemansvarlige virksomhed. Nøjagtighedskrav til EMT-simuleringsmodellen og den anvendte evalueringsmetode er dermed identisk med den påkrævede RMS-simuleringsmodel, jf. **Afsnit 3.2.1.1**.

### 3.2.4 Krav til harmonisk simuleringsmodel

Simuleringsmodellen for det samlede produktionsanlæg skal repræsentere anlæggets emission af harmoniske overtoner og passive harmoniske respons (harmoniske impedans) i nettilslutningspunktet, gældende for det definerede normaldriftsområde [1] og under alle relevante stationære netforhold, hvor produktionsanlægget skal kunne drives.

Simuleringsmodellen skal leveres som en Théveninækvivalent repræsentativ for produktionsanlæggets emission af heltals harmoniske samt anlæggets passive respons i frekvensområdet 50 Hz til 2500 Hz. Modellen skal indeholde de relevante synkron-, invers- og nul-sekvensimpedanser i det specificerede frekvensområde og frekvensopløsningen for enkeltanlægsmodellen skal være 1 Hz.

Hvis anlægget består af flere produktionsanlæg, skal der foruden enkeltanlægsmodellen, leveres en aggregeret simuleringsmodel repræsentativ for den samlede emission samt det samlede passive harmoniske respons i nettilslutningspunktet gældende for samme frekvensområde og opløsning som enkeltanlægsmodellerne.

Hvis produktionsanlæggets emission eller impedanser er afhængige af anlæggets arbejds punkt skal modellen leveres ved tre effektområder ved nominel spænding og nul reaktiv effekt;  $P = 0,0$  pu,  $P = 0,5$  pu og  $P = 1,0$  pu. Derudover skal det beskrives, hvordan reaktiv effekt påvirker harmoniske emission og impedans. Desuden skal Anlægsejeren levere en model opsat med højeste emission per harmoniske; hvor dette er gældende både for den aggregerede samt enkeltanlægsmodellen. Det er Anlægsejerens ansvar at dokumentere afhængighed af arbejds punktet samt at sikre korrekt implementering i modellerne.

Det er Anlægsejerens ansvar at specificere en metode for summering af emission fra flere produktionsanlæg. Dette kan enten gøres ved at specificere krav til fastsættelse af vinklen på Théveninspændingen for hver harmoniske frekvens givet specifikt for hvert produktionsanlæg. Alternativt benyttes en summeringslov som eksempelvis angivet i [7]. Benyttes en summeringslov, skal  $\alpha$ -koefficienterne fastsættes af Anlægsejeren. Der skal redegøres for valg af  $\alpha$ -koefficienterne for alle harmoniske. Det er for begge metoder Anlægsejerens ansvar at redegøre for, at den anvendte metode giver et korrekt respons for produktionsanlæggets samlede emission.

Data for netkomponenter og øvrige dele, som indgår i anlægsinfrastrukturen, skal have et omfang og et detaljeringniveau, som muliggør opbygning af en komplet frekvensafhængig simuleringsmodel i frekvensområdet 50 Hz til 2500 Hz. Dette inkluderer opsamlingskabler, transformere, filtre mm. Omfanget af leverancen godkendes af den systemansvarlige virksomhed.

#### 3.2.4.1 Nøjagtighedskrav

Metoden anvendt til opstilling af modellen for den enkelte produktionsenhed skal specificeres og godkendes af den systemansvarlige virksomhed. Bestemmes modelparametre ved måling, skal en målerapport vedlægges som dokumentation. Desuden skal der redegøres for, hvordan modelparametre fastsættes ud fra målerapportens resultater. Fastsættes modelparametre ved beregning eller simulering, skal metoden anvendt specificeres samt eksempler på resultatbehandling for udledning af modelparametre gives.

## 4. Verifikation af simuleringsmodel

Anlægsejeren skal sikre, at simuleringsmodellerne er verificeret, jf. **Afsnit 2**. Anlægsejeren er ansvarlig for al udførelse af test til modelverifikation, herunder fremskaffelse af nødvendigt måleudstyr, dataloggere og personel. Anlægsejeren er desuden ansvarlig for gennemførelse og dokumentation af den påkrævede modelverifikation, herunder dokumentation af overholdelse af de definerede nøjagtighedskrav til simuleringsmodellen.

Den praktiske udførelse af overensstemmelsesprøvninger skal ske som specificeret i [1], hvor omfanget af modelvalideringen fastlægges i samarbejde med den systemansvarlige virksomhed, efter oplæg fra Anlægsejeren.

LAN: Jeg antager, at der udvælges/defineres/beskrives 10-15 standardtests for hver anlægstype, således de modellerede reguleringsfunktioner for aktiv og reaktiv effekt kan verificeres. Vi har gode erfaringer fra idriftsættelse af AVR-systemer for termiske anlæg og tilsvarende standardtests ønskes defineret i samarbejde med vindmølleindustrien. Der bør udarbejdes et officielt notat, hvor disse test og tilhørende randbetingelser dokumenteres.

Anlægsejeren skal dokumentere målingerne anvendt til verifikation af simuleringsmodellen for produktionsanlægget i form af en rapport, indeholdende beskrivelser af hvert datasæt, herunder de aktuelle randbetingelser for de gennemførte overensstemmelsesprøvninger og årsag til eventuelle afvigelser i forhold til aftalte randbetingelser.

Måleresultater sammenholdes med de tilsvarende simulerede resultater og simuleringsmodellens nøjagtighed dokumenteres i form af en verifikationsrapport. Modelverifikationsproceduren betragtes først som afsluttet når den systemansvarlige virksomhed har godkendt den af Anlægsejeren fremsendte modelverifikationsrapport.

Tidsseriemålingerne anvendt til verifikation af simuleringsmodellen skal vedlægges verifikationsrapporten i CSV-format (comma-separated values).

### 4.1.1 Verifikationskrav til stationær simuleringsmodel (stationære- og kortslutningsforhold)

Verifikation ikke påkrævet, dog skal det dokumenteres, at den stationære simuleringsmodel er repræsentativ for produktionsanlæggets stationære- og quasi-stationære egenskaber, hvor et særligt fokus skal rettes mod anlæggets subtransiente- og transiente kortslutningsbidrag i forbindelse med en vilkårlig fejl i det kollektive elforsyningsnet.

### 4.1.2 Verifikationskrav til dynamisk simuleringsmodel (RMS-model)

Simuleringsmodellen skal verificeres af Anlægsejeren for det samlede produktionsanlæg omfattende samtlige påkrævede reguleringsformer [1] og eftervisning af produktionsanlæggets egenskaber ved påtrykning af de i **Afsnit 3.1.1** og **Afsnit 3.1.2** beskrevne setpunktsændringer og eksterne hændelser i det kollektive elforsyningsnet.

Modelverifikationen sker på baggrund af måleresultater optaget i forbindelse med gennemførelsen af typetest eller de påkrævede overensstemmelsesprøvninger ved produktionsanlæggets idriftsættelse [1] eller ved kombination af disse, således de opstillede funktionskrav til og nøjagtigheden af den påkrævede simuleringsmodel kan verificeres.

For synkrone produktionsanlæg bestående af flere enkeltanlæg skal modelverifikationen gennemføres for hvert af disse enkeltanlæg.

For asynkrone produktionsanlæg, der består af flere enkeltanlæg, indeholder centrale kontrol-, beskyttelses-, og reguleringsfunktioner eller anvender eventuelle eksterne komponenter, og dermed fremstår som et aggregeret produktionsanlæg i nettilslutningspunktet, skal modelverifikationen gennemføres på aggregeret niveau og dermed repræsentere produktionsanlæggets samlede egenskaber i nettilslutningspunktet. For denne type produktionsanlæg kræves, jf. **Afsnit 2**, individuelle simuleringsmodeller for hver type enkeltanlæg (eksempelvis én model for hver af de anvendte vindmølletyper) og eksterne komponenter (eksempelvis én model for hver af de anvendte energilagringenheder etc.), hvorfor modeldannelsen af disse enkeltanlæg og komponenter skal verificeres enkeltvis.

#### 4.1.2.1 Særlige forhold vedrørende modelverifikation af asynkrone produktionsanlæg (Type C)

For asynkrone produktionsanlæg (Type C) er der som udgangspunkt ikke krav om modelverifikation på aggregeret niveau i nettilslutningspunktet. Modelverifikationen for denne type produktionsanlæg kan ske i form af en (certificeret) typetest af et enkeltanlæg eller ved gennemførelse af de påkrævede overensstemmelsesprøvnings ved produktionsanlæggets idriftsættelse [1].

For asynkrone produktionsanlæg (Type C), hvor der anvendes eksterne komponenter, fx STATCOMs eller energilagringenheder m.m. eller hvor der anvendes site-specifikke funktioner for produktionsanlæggets kontrol-, beskyttelses-, og reguleringsfunktioner, herunder parkregulator, skal modelverifikationen gennemføres på aggregeret niveau og dermed repræsentere produktionsanlæggets samlede egenskaber i nettilslutningspunktet, jf. **Afsnit 4.1.2**.

#### 4.1.2.2 Påkrævet signalomfang ved verifikation af synkrone produktionsanlæg

Som minimum skal følgende målesignaler optages i forbindelse med de gennemførte overensstemmelsesprøvnings ved produktionsanlæggets idriftsættelse til brug for den efterfølgende modelverifikation:

- Aktiv effekt – målt i nettilslutningspunktet
- Reaktiv effekt – målt i nettilslutningspunktet
- Fasespændinger – målt i nettilslutningspunktet
- Fasestrømme – målt i nettilslutningspunktet
- Netfrekvens – målt i nettilslutningspunktet
- Aktiv effekt – målt ved generatorklemmerne
- Reaktiv effekt – målt ved generatorklemmerne
- Fasespændinger – målt ved generatorklemmerne
- Fasestrømme – målt ved generatorklemmerne
- Feltstrøm – målt ved generatorklemmerne (eller for magnetiseringsmaskine hvis anvendt)
- Feltspænding - målt ved generatorklemmerne (eller for magnetiseringsmaskine hvis anvendt)
- AVR udgangssignaler fra dæmpetilsats (PSS) (Hvis et separat signal er til rådighed)
- AVR signaler (alarmer) for aktivering af begrænserefunktioner
- Generatorens omløbshastighed
- Frekvensrespons for kontrol- og reguleringsmodelsmodeller
- Setpunkter for:
  - Aktiv effektregulering
  - Effektfaktor-regulering ( $\cos \phi$ -regulering)

- Q-regulering (Mvar-regulering)
- Spændingsregulering
- Frekvens- eller hastighedsregulering
- Signal for aktivering af systemværn

#### 4.1.2.3 Påkrævet signalomfang ved verifikation af asynkrone produktionsanlæg

Som minimum skal følgende målesignaler optages i forbindelse med den gennemførte overensstemmelsesprøvning ved produktionsanlæggets idriftsættelse til brug for den efterfølgende modelverifikation:

- Aktiv effekt – målt i nettilslutningspunktet
- Reaktiv effekt – målt i nettilslutningspunktet
- Fasespændinger – målt i nettilslutningspunktet
- Fasestrømme – målt i nettilslutningspunktet
- Netfrekvens – målt i nettilslutningspunktet
- Aktiv effekt – målt ved primærsiden af maskintransformer
- Reaktiv effekt – målt ved primærsiden af maskintransformer
- Fasespændinger – målt ved primærsiden af maskintransformer
- Fasestrømme (resulterende) - målt ved primærsiden af maskintransformer
- Fasestrømme (aktiv komponent) – målt ved primærsiden af maskintransformer
- Fasestrømme (reaktiv komponent) – målt ved primærsiden af maskintransformer
- Kontrolsignaler (alarmer) for aktivering af *fault-ride through* funktion
- Generatorens omløbshastighed – hvor dette er relevant
- Setpunkter for:
  - Aktiv effektregulering
  - Effektfaktor-regulering ( $\cos \phi$ -regulering)
  - Q-regulering (Mvar-regulering)
  - Spændingsregulering
  - Frekvens- eller hastighedsregulering
- Signal for aktivering af systemværn

#### 4.1.3 Verifikationskrav til transient simuleringsmodel (EMT-model)

Identisk med verifikationskrav til RMS-model, jf. **Afsnit 4.1.2.**

#### 4.1.4 Verifikationskrav til harmonisk simuleringsmodel

Intet krav om modelverifikation.



## 5. Referencer

1. Kommissionens Forordning (EU) 2016/631 af 14. april 2016 om fastsættelse af netregler om krav til produktionsanlæg
2. IEEE Standard 421.5: Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies
3. IEEE Dynamic Models for Turbine-Governors in Power System Studies PES-TR1, January 2013
4. Power System Stability and Control, Prabha Kundur, 1994
5. IEC 61400-21: Wind turbines - Part 21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines
6. IEC 61400-27-2: Wind turbines – Part 27-2: Electrical simulation models – Model validation
7. IEC 61000-3-6: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-6: Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems

## Bilag 1

### Synkrone produktionsanlæg

Signaler omfattet af modelverifikationskravet:

- Aktiv effekt – målt i nettilslutningspunktet
- Reaktiv effekt – målt i nettilslutningspunktet
- Fasespændinger – målt i nettilslutningspunktet
- Fasestrømme – målt i nettilslutningspunktet
- Feltstrøm – målt ved generatorklemmerne (eller for magnetiseringsmaskine hvis anvendt)
- Feltspænding - målt ved generatorklemmerne (eller for magnetiseringsmaskine hvis anvendt)
- Generatorens omløbshastighed
- Frekvensrespons for kontrol- og reguleringssystemmodeller

### Asynkrone produktionsanlæg

Signaler omfattet af modelverifikationskravet:

- Aktiv effekt – målt i nettilslutningspunktet (eller ved primærsiden af maskintransformer ved typetest)
- Reaktiv effekt – målt i nettilslutningspunktet (eller ved primærsiden af maskintransformer ved typetest)
- Fasestrømme (aktiv komponent) – målt i nettilslutningspunktet (eller ved primærsiden af maskintransformer ved typetest)
- Fasestrømme (reaktiv komponent) – målt i nettilslutningspunktet (eller ved primærsiden af maskintransformer ved typetest)