



Energinet
Tonne Kjærvej 65
DK-7000 Fredericia

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

Dato:
22. oktober 2020

Forfatter:
LAN/CFJ/CSH

BILAG 1B

REQUIREMENTS FOR GENERATORS (RFG)

- KRAV TIL SIMULERINGSMODEL

2	Offentlig udgave	LAN CFJ CSH	JMI	MPO HAB KDL JGA VLA JKW	SBN PHT	22.10.2020
REV.	DESCRIPTION	PREPARED	CHECKED	REVIEWED	APPROVED	DATE

AFSNIT	TEKST	REVISION	DATO
2	Tabel 1: produktionsanlægstype C nærmere specificeret	2	22.10.2020
Alle	Redaktionelle rettelser, krydshenvisninger klikbare		
3.2.2.1.1	Opdatering ifm. Forsyningstilsynets godkendelse af indsendte krav (beskrivelse af anvendelsen af per unit værdier, Tabel 2)	1	13.11.2018

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 synkron produktionsanlæg og asynkron (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.
- Verifikationskrav for de påkrævede simuleringsmodeller.

Indhold

1. Baggrund	3
2. Generelle krav til simuleringsmodel	3
2.1 Særlige forhold vedrørende modelleverance for asynkrone produktionsanlæg (Type C)	4
2.2 Overordnet dokumentationskrav	5
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)	7
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	20
4. Verifikation af simuleringsmodel	21
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 behov 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 rotorvinkelstabilitet, kortslutningsforhold, transiente fænomener samt harmoniske forhold.

Hjemlen til at fastsætte krav til simuleringsmodeller er givet i [1]. Den systemansvarlige virksomhed har ved kravfastsættelsen i størst muligt omfang refereret til internationale standarder, således anvendte definitioner og procedurer er i overensstemmelse med internationale standarder.

2. Generelle krav til simuleringsmodel

Anlægsejeren skal stille simuleringsmodeller til rådighed for den systemansvarlige virksomhed [1], hvor disse simuleringsmodeller på korrekt vis skal 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 [1] 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
Type A	Intet krav om simuleringsmodel	Intet krav om simuleringsmodel
Type B	Intet krav om simuleringsmodel	Intet krav om simuleringsmodel
Type C, når den nominelle aktive effekt ≥ 10 MW	Stationær simuleringsmodel RMS-simuleringsmodel	Stationær simuleringsmodel RMS-simuleringsmodel
Type D	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 verifikationsstandarder, og skal 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* [1] af produktionsanlæggets egenskaber, skal anlægsejeren stille en opdateret¹ og dokumenteret simuleringsmodel til rådighed for det ombyggede anlæg.

Modelleverancen betragtes først som afsluttet, når den systemansvarlige virksomhed har godkendt de af anlægsejeren fremsendte simuleringsmodeller 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 et 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.

¹ 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 fuldt dokumenteret simuleringsmodel i henhold til denne modelkravspecifikation.

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 parametring og gyldige randbetingelser i form af arbejds punkter og eventuelle restriktioner i relation til netforhold (korts lutningsforhold 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, fx det maksimalt 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 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 parameter værdier skal kunne genfindes i de medfølgende datablade for hovedkomponenter, blokdiagrammer og overføringsfunktioner m.m.
- Beskrivelse af opbygning og aktiveringsniveauer for anvendte beskyttelsesfunktioner.
- Beskrivelse af opsætning og initialisering af simuleringsmodellen samt eventuelle begrænsninger for anvendelsen af denne.
- 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.

Modelspecifikke dokumentationskrav er beskrevet i de efterfølgende afsnit.

3. Modeltekniske krav

3.1 Synkrone produktionsanlæg

3.1.1 Krav til stationær simuleringsmodel (stationære forhold og korts lutningsforhold)

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 korts lutning i nettilslutningspunktet eller et vilkårligt sted i det kollektive elforsyningsnet. En korts lutning kan her antage form som:

- En fase-jord korts lutning med en vilkårlig impedans i fejlstedet.
- En to-faset korts lutning uden eller med jordberøring med en vilkårlig impedans i fejlstedet.
- En trefaset korts lutning 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 asymmetriske 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 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 eller på anden måde forhindre integration mellem den af anlægsejeren 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.

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

Simuleringsmodellen skal verificeres, som specificeret i Afsnit 4.

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 dette, samt nedenstående eksterne hændelser, eller kombinationer af disse eksterne hændelser i det kollektive elforsyningsnet:

- Generatoren fejl set fra nettilslutningspunktet i henhold til den påkrævede FRT-karakteristik [1], 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 minimumssimulerings Tid, jf. nedenstående, og som minimum indenfor indsvingningsforløbet for produktionsanlæggets overgang til en ny stationær tilstand.
- Frekvensforstyrrelser med en varighed indenfor den påkrævede minimumssimulerings Tid, jf. nedenstående, og som minimum indenfor indsvingningsforløbet for produktionsanlæggets overgang til en ny stationær tilstand.
- Aktivisering 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-domæneoverføringsfunktioner, sekvensdiagrammer for anvendte *state-machines* samt funktionsbeskrivelser af anvendte aritmetiske, logiske og sekvensstyrede moduler i simuleringsmodellen.
- Indeholde beskrivelser af og tilhørende parametre for de enkelte modelkomponenter, herunder mætning, ulinearitet, dødbånd, tidsforsinkelser samt begrænserfunktioner (non-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 (statik og dødbånd).
 - Systemværsindgreb (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 relevante beskyttelsesfunktioner, som kan aktiveres ved eksterne hændelser og fejl i det kollektive elforsyningsnet implementeret i form af blokdiagrammer med angivelse af overføringsfunktioner og sekvensdiagrammer for de enkelte elementer.
- Indeholde magnetiseringssystemet, spændingsregulator, dæmpetilsats (PSS) og eventuel magnetiseringsmaskine implementeret i form af standardiserede modeller [2].
- Indeholde magnetiseringssystemets begrænserefunktioner (statorstrømsbegrænsere, volt/hertz-begrænsere samt over- og undermagnetiseringsbegrænsere) implementeret i form af blokdiagrammer med angivelse af overføringsfunktioner og sekvensdiagrammer for de enkelte elementer.
- Indeholde effekt- og hastighedsregulator, drivmaskine eller turbineanlæg implementeret 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 virksomhed 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 asymmetriske 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 svar, herunder krav til dæmpetilsats (PSS) med hensyn til dæmpning og fasekompensering [1].
- Kunne initialiseres i et stabilt arbejds punkt på baggrund af én 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 simulering på minimum 60 sekunder uden påtrykning af et hændelsesforløb eller ændring af randbetingelser, hvor de simulerede værdier for aktiv effekt, reaktiv effekt, spænding og frekvens skal forblive konstante under hele simuleringsforløbet.
- Være numerisk stabil ved et momentant vektorspring på op til 20 grader i nettilslutningspunktet.
- Kunne udnytte numeriske ligningslødere med variabelt tidsskridt i intervallet 1 til 10 ms.
- 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 eksterne hændelser. Dette vil dog i udgangspunktet blive opfattet som modelimplementeringsmæssig imperfektion, hvor årsagen og forslag til afhjælpning af denne 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 produktionsanlægget indeholder flere parallelle generatoranlæg, skal simuleringsmodellen kunne repræsentere produktionsanlæggets egenskaber i nettilslutningspunktet, jf. ovenstående. Simuleringsmodellens 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 parameteromregninger samt forudsætningerne herfor.

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 eller på anden måde forhindre integration mellem den af anlægsejeren 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 *non-reciprocal per unit*-systemet [4], hvilket skal anvendes som baseværdi for den anvendte model for produktionsanlæggets spændingsregulator. Anvendelse af skaleringsfaktorer skal angives eksplicit for signaler mellem magnetiseringssystemets øvrige funktioner, hvis der anvendes forskellige baseværdier for de pågældende delmodeller.

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.

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

Som minimum skal følgende af simuleringsmodellens reguleringsfunktioner inkluderes i modelverifikationen:

- Reaktiv effektregulering:
 - Effektfaktor-regulering ($\cos \phi$ -regulering).
 - Q-regulering (Mvar-regulering).
- Spændingsregulering (spændingsreferencepunkt i nettilslutningspunktet).
- Frekvensregulering (påkrævede reguleringsfunktioner).
- 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 mellem modellens simulerede svar i forhold til den tilsvarende målte værdi.

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

For at sikre en objektiv vurdering af simuleringsmodellens nøjagtighed, skal følgende kvantitative krav være opfyldte for hver af de gennemførte standardtest. Det skal bemærkes, at samtlige kriterier gælder, og at intet kriterium kan tilsidesætte et andet.

For magnetiseringssystemet og dæmpetilsats (PSS) skal nøjagtigheden for frekvensresponsen (V_t/V_{ref}) indenfor frekvensområdet 0,1 Hz til 5 Hz være indenfor følgende tolerance:

- (a) Afvigelsen mellem den simulerede amplitude og den tilsvarende målte amplitude skal være mindre end 10 % for en vilkårlig frekvens indenfor det definerede frekvensområde.

- (b) Afvigelsen mellem den simulerede fasevinkel og den tilsvarende målte fasevinkel skal være mindre end 5 grader for en vilkårlig frekvens indenfor det definerede frekvensområde.

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

1. Afvigelser mellem simulerede gradienter (dx/dt) sammenlignet med tilsvarende målte gradienter skal være indenfor 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 modelverifikationsrapport.
3. Simulerede quasi-stationære oscillationer indenfor frekvensområdet 0,1 Hz til 5 Hz i produktionsanlæggets aktive og reaktive effektproduktion samt spænding skal være dæmpede, og frekvensafvigelsen skal være mindre end 10 % af den tilsvarende målte værdi.
4. Under hensyntagen til eventuel forskel i simuleret og målt spænding i nettilslutningspunktet skal afvigelsen mellem produktionsanlæggets simulerede aktive og reaktive effektproduktion til enhver tid under simuleringen være mindre end 10 % af den tilsvarende målte værdi.
5. Under hensyntagen til eventuel forskel i simuleret og målt spænding i nettilslutningspunktet skal afvigelsen mellem produktionsanlæggets simulerede stationære aktive og reaktive effektproduktion, i forhold til den tilsvarende målte værdi, være mindre end 2 % af produktionsanlæggets nominelle effekt.

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

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 at 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 asymmetriske 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 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.

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 eller på anden måde forhindre integration mellem den af anlægsejeren 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.

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

Simuleringsmodellen skal verificeres, som specificeret i Afsnit 4.

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 [1], 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, og som minimum indenfor indsvingningsforløbet for produktionsanlæggets overgang til en ny stationær tilstand.
- Frekvensforstyrrelser med en varighed indenfor den påkrævede minimumssimuleringstid, jf. nedenstående, og som minimum indenfor indsvingningsforløbet for produktionsanlæggets overgang til en ny stationær tilstand.
- 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 af og tilhørende parametre for de enkelte modelkomponenter, herunder mætning, ulinearitet, dødbånd, tidsforsinkelser samt begrænserfunktioner (non-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 (statik og dødbånd).
 - 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 relevante beskyttelsesfunktioner, som kan aktiveres ved eksterne hændelser og fejl i det kollektive elforsyningsnet implementeret i form af blokdiagrammer med angivelse af overføringsfunktioner og sekvensdiagrammer for de enkelte elementer.
- Indeholde samtlige kontrolfunktioner², som kan aktiveres ved alle relevante hændelser og fejl i det kollektive elforsyningsnet.
- Indeholde produktionsanlæggets effekt- og hastighedsregulator.

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

- Indeholde en samlet mekanisk svingningsmassemodel for produktionsanlæggets drivtog, inklusive dokumentation af inertikonstanter, egenfrekvenser samt fjeder- og dæmpningskonstanter for hvert af drivtogets masselementer, såfremt dette er relevant for 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 asymmetriske 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 initialiseres i et stabilt arbejds punkt på baggrund af én 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 setpunktændringer og eksterne hændelser i det kollektive elforsyningsnet.
- Være numerisk stabil ved gennemførelse af en simulering på minimum 60 sekunder uden påtrykning af et hændelsesforløb eller ændring af randbetingelser, hvor de simulerede værdier for aktiv effekt, reaktiv effekt, spænding og frekvens skal forblive konstante under hele simuleringsforløbet.
- Kunne udnytte numeriske ligningslødere med variabelt tidsskridt i intervallet 1 til 10 ms.
- Være numerisk stabil ved et momentant vektorspring på op til 20 grader i nettilslutningspunktet.
- 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 eksterne hændelser. Dette vil dog i udgangspunktet blive opfattet som modelimplementeringsmæssig imperfektion, hvor årsagen og forslag til afhjælpning af denne 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.

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.

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 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 eller på anden måde forhindre integration mellem den af anlægsejeren 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.

Anlægsejeren skal sikre, at simuleringsmodellerne er verificeret med resultaterne af de påkrævede overensstemmelsesprøvninger [1] samt relevante test- og verifikationsstandarder [5,6] og fremsende den nødvendige dokumentation herfor.

Eftersom modelverifikationen 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 verifikationsproceduren 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 nettilslutningspunkt, fx i forbindelse med kortslutning af en netkomponent eller i forbindelse med manuel kobling med en netkomponent i det kollektive elforsyningsnet. Test og verifikation 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 standardtests gennemføres normalt for et enkeltanlæg, hvor en veldefineret spændingsprofil påtrykkes produktionsanlægget, typisk på højspændingssiden af den anvendte maskintransformer.

Det primære formål med disse standardtests er verifikation og certificering af produktionsanlæggets overholdelse af de påkrævede FRT-egenskaber, herunder krav om levering af dynamisk spændingsstøtte (reaktiv tillægsstrøm I_Q) under fejlforløbet i henhold til den definerede

karakteristik [1]. Resultaterne af disse standardtests anvendes ved den efterfølgende verifikation af de opstillede funktionskrav til, og nøjagtigheden af, den påkrævede simuleringsmodel.

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

Modelverifikationen er baseret på evaluering af simuleringsmodellens statistiske nøjagtighed, hvor nøjagtigheden fastlægges på baggrund af beregning af afvigelsen mellem modellens simulerede svar og 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).

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

For at sikre en objektiv vurdering af simuleringsmodellens nøjagtighed skal følgende kvantitative krav være opfyldt for hver af de gennemførte standardtests, idet de for modellen beregnede afvigelser skal være mindre end eller lig med de i Tabel 2 angivne tilladelige afvigelser for hver af de i [6] definerede tidsperioder (pre-fault, fault og post-fault).

De i Tabel 2 angivne tilladelige afvigelser for de specificerede elektriske signaler er angivet i forhold til produktionsanlæggets baseværdier i form af nominel aktiv effekt (gældende for evaluering af værdier for aktiv effekt og reaktiv effekt) samt nominel strøm (gældende for evaluering af værdier for aktiv strømkomponent og reaktiv strømkomponent), jf. definitionen i [6].

		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 samtlige af de definerede tolerancer i forhold til tilladelig afvigelse er opfyldte.

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 setpunktsændring for anlæggets produktion af aktiv effekt eller tilsvarende ændring af setpunktet for de øvrige påkrævede reguleringsfunktioner. Test og verifikation af et produktionsanlægs stationære og dynamiske egenskaber i forbindelse med sådanne setpunktsændringer gennemføres typisk i sammenhæng med de påkrævede overensstemmelsesprøvninger [1].

Det primære formål med disse standardtests 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 begrænserfunktioner samt verifikation af produktionsanlæggets arbejdsområde m.m.

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

De til modelverifikationen anvendte standardtests 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 (påkrævede reguleringsfunktioner).
- 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.

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

For at sikre en objektiv vurdering af simuleringsmodellens nøjagtighed skal følgende kvantitative krav, som er gældende for produktionsanlæggets steprespons, jf. definitionen i [6], være opfyldt for hver af de gennemførte standardtests, 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
	$X_E = X_{sim} - X_{m\ddot{a}lt}$	$X_E = X_{sim} - X_{m\ddot{a}lt}$	$X_E = X_{sim} - X_{m\ddot{a}lt}$	$X_E = X_{sim} - X_{m\ddot{a}lt}$	$X_E = X_{sim} - X_{m\ddot{a}lt}$
Tilladelig afvigelse	< 50 ms	< 50 ms	< 100 ms	< 15 %	< 2 % af P_{nomi-} nel

Tabel 3 Nøjagtighedskrav - tilladelige afvigelse

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

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

3.2.3 Krav til transient simuleringsmodel (EMT-model)

Anlægsejer har til ansvar at levere en transient simuleringsmodel 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 anlægsejer og producenten af produktionsenheden. Afhængighed 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 sekunders 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 detaljeringsniveau, 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 svingningsmassemodel for produktionsanlæggets drivtøj inklusive dokumentation af inertikonstanter, egenfrekvenser samt fjeder- og dæmpningskonstanter, såfremt dette er relevant for repræsentationen af produktionsanlæggets stationære og dynamiske egenskaber.

- 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 reguleringsregime 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-modellens brugervejledning.
- 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.

3.2.3.1 Modelleverance

EMT-modellen skal ved levering bestå af følgende:

- PSCAD/EMTDC simuleringsmodel – version efter aftale med den systemansvarlige virksomhed.
- Brugervejledning med beskrivelse af modelbegrænsninger.
- Verifikationsrapport for EMT-modellen.
- En funktionel PSCAD simuleringsmodel skal leveres for produktionsanlægget forbundet til en simpel modelrepræsentation af det kollektive elforsyningsnet, f.eks. en Théveninækvivalent model.
- Brugervejledningen skal beskrive modelantagelser og anvendelse af EMT-modellen.
- En detaljeret beskrivelse af modelbegrænsninger skal leveres, med beskrivelse af alle de af produktionsanlæggets funktioner, der ikke er inkluderet i EMT-modellen, som ville kunne antages at have betydning for produktionsanlæggets transiente elektriske egenskaber og performance.
- Verifikationsrapporten for EMT-modellen skal indeholde sammenligning af PSCAD/EMTDC modellens stationære og dynamiske respons med målinger foretaget på den virkelige produktionsenhed. Dette omfatter ikke stationære harmoniske forhold.

3.2.3.2 Nøjagtighedskrav

Nøjagtigheden af den påkrævede transiente simuleringsmodel fastlægges på samme måde som for den dynamiske simuleringsmodel (RMS-model), jf. Afsnit 3.2.1.1, ved anvendelse af passende filtrering til beregning af grundtonekomponenten af målte og simulerede værdier. Metoden anvendt til filtrering aftales mellem anlægsejer og den systemansvarlige virksomhed. Nøjagtighedskravet til den transiente simuleringsmodel og den anvendte evalueringsmetode er dermed identisk med den påkrævede dynamiske simuleringsmodel.

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.

Enkeltanlægsmodel skal leveres som en Théveninækvivalent repræsentativ for produktionsanlæggets emission af heltals-harmoniske, angivet som RMS-spændinger, 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 med frekvensopløsningen på 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. Krav til frekvensområde og opløsning er identisk med enkeltanlægsmodellen.

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 den 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 punkt 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 harmonisk frekvens givet specifikt for hvert produktionsanlæg. Alternativt benyttes en summeringslov som eksempelvis angivet i [7]. Benyttes en summeringslov, skal α -koefficienterne fastsættes af anlægsejeren. Der skal redegøres for valg af α -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 detaljeringsniveau, 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. Fastsettes 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 [1]. 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 modelverifikationen fastlægges i samarbejde med den systemansvarlige virksomhed, efter oplæg fra anlægsejeren.

Anlægsejeren skal dokumentere målingerne anvendt til verifikation af simuleringsmodellen for produktionsanlægget i form af en rapport indeholdende beskrivelser af hvert datasæt, herunder det anvendte måleudstyr og den efterfølgende databehandling, samt randbetingelser for de gennemførte overensstemmelsesprøvninger og årsag til eventuelle afvigelser i forhold til de specificerede 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 er 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 og eftervisning af produktionsanlæggets stationære og dynamiske egenskaber ved påtrykning af de i Afsnit 3.1.2 og Afsnit 3.2.2 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 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 (fx én model for hver af de anvendte vindmølletyper) og eksterne komponenter (fx én model for hver af de anvendte energilagringenheder etc.), hvorfor modeldannelsen af disse enkeltanlæg og eksterne 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 pro-

duktionsanlæg kan ske i form af en (certificeret) typetest af et enkeltanlæg eller ved gennemførelse af de påkrævede overensstemmelsesprøvnings ved produktionsanlæggets idriftsættelse.

For asynkrone produktionsanlæg (Type C), hvor der anvendes eksterne komponenter, fx STATCOMs eller energilagringenheder, 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 begrænserfunktioner.
- Generatorens omløbshastighed.
- Frekvensrespons for magnetiseringssystemet og dæmpetilsats (PSS) (V_t/V_{ref}).
- 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 de gennemførte typetest og den 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 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* funktioner.
- 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.

HISTORISK

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.
4. P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 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.

HISTORISK

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).