

**ENERGINET**

Energinet
Tonne Kjærsvej 65
DK-7000 Fredericia

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

Dato:
14. oktober 2019

Forfatter:
JGA/AIE

ANNEX B - KRAV TIL SIMULERINGSMODELLER FOR HVDC-ANLÆG - REV. 0

Nærværende kravspecifikation omfatter Energinets krav til simuleringmodeller i forbindelse med nettilslutning af HVDC-anlæg. Kravspecifikationen indgår som baggrund i forbindelse med implementering af EU-forordning 2016/1447 af 26. august 2016 om fastsættelse af netregler om tilslutning af transmissionssystemer med højspændingsjævnstrøm og jævnstrømsforbundne elproducerende anlæg (herefter forordningen), og omhandler således krav til HVDC-anlæg.

Notatet beskriver følgende:

- Funktionelle krav til de påkrævede simuleringmodeller
- Krav til strukturel opbygning og implementering af de påkrævede simuleringmodeller
- Dokumentationskrav for påkrævede simuleringmodeller
- Verifikationskrav for de påkrævede simuleringmodeller.

0	Publiceret udgave	AIE	JGA	FBN	JBO	18-02-2019
REV.	BESKRIVELSE	UDARBEJDET	KONTROLLERET	GENNEMGÅET	GODKENDT	DATO

Revisionsoversigt

AFSNIT	TEKST	REV.	DATO
	Oprindelige udgave til Forsyningstilsynet	a	
	Ændrede krav	b	18-02-2019
Forside	Indføjet dato for Fsts' afgørelse	0	14-10-2019

Indhold

1. Baggrund	3
2. Generelle krav til simuleringsmodel	3
2.1 Overordnet dokumentationskrav	4
3. Modeltekniske krav	5
3.1 Krav til stationær simuleringsmodel (stationære forhold og kortslutningsforhold)	5
3.1.1 Nøjagtighedskrav	6
3.2 Krav til dynamisk simuleringsmodel (RMS-model)	6
3.2.1 Nøjagtighedskrav	9
3.2.2 Nøjagtighedskrav i forbindelse med eksterne hændelser i det kollektive elforsyningsnet	9
3.2.3 Nøjagtighedskrav i forbindelse med ændringer af HVDC-anlæggets arbejds punkt	9
3.3 Krav til transient simuleringsmodel (EMT-model)	10
3.3.1 Modelleverance	11
3.3.2 Nøjagtighedskrav	12
3.4 Krav til harmonisk simuleringsmodel	12
3.4.1 Nøjagtighedskrav	12
4. Verifikation af simuleringsmodel	13
4.1 Verifikationskrav til stationær simuleringsmodel (stationære og kortslutningsforhold)	13
4.2 Verifikationskrav til dynamisk simuleringsmodel (RMS-model)	13
4.2.1 Påkrævet signalomfang ved verifikation af HVDC-anlæg	13
4.3 Verifikationskrav til transient simuleringsmodel (EMT-model)	14
4.4 Verifikationskrav til harmonisk simuleringsmodel	14

1. Baggrund

Den igangværende omstilling af elsystemet, hvor konventionelle HVDC-anlæg gradvist udfases og erstattes af mere fleksible HVDC-anlæg, medfører, at den systemansvarlige virksomhed har behov for større indsigt i de nye anlægs strukturelle opbygning og deres systemmæssige påvirkning af det kollektive elforsyningsnet.

Til analyser 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 HVDC-anlæg. Til dette formål kræves opdaterede og retvisende simuleringmodeller for nettilsluttede forbrugs-, produktions- og HVDC-anlæg.

Simuleringsmodellerne benyttes til analyse af transmissions- og distributionsnettets stationære og dynamiske forhold, herunder spændings-, frekvens- og rotorvinkelstabilitet, kortslutningsforhold, transiente fænomener samt harmoniske forhold. Simuleringsmodellerne skal gøre det muligt at gennemføre analyser af effektflow, balancerede og ubalancerede fejl, low-voltage ride-through (LVRT) begivenheder, harmoniske forhold, flicker, væsentlige spændingsændringer, samspil med andet elektronisk udstyr og subsynkrone oscillationer. Alle simuleringmodeller skal kunne vise de specificerede driftsforhold.

2. Generelle krav til simuleringmodel

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

Leveringsomfanget for simuleringmodeller for det enkelte HVDC-anlæg er som minimum:

- Stationær simuleringmodel
- RMS-simuleringmodel
- EMT-simuleringmodel
- Harmonisk simuleringmodel

Anlægsejeren er ansvarlig for, at en sådan modelfremsendelse finder sted til rette tid i henhold til den gældende procedure for nettilslutning af HVDC-anlæg og forordningens øvrige bestemmelser, således at der både fremsendes foreløbig og endelig model.

Anlægsejeren skal sikre, at simuleringmodellerne er verificeret med resultaterne af de definerede overensstemmelsesprøvninger samt relevante fabrikstest, og skal fremsende den nødvendige dokumentation herfor.

Såfremt HVDC-anlægget indeholder eksterne komponenter, fx af hensyn til overholdelse af nettilslutningskravene eller til levering af kommercielle systemydelser, skal simuleringmodellen indeholde den nødvendige repræsentation af disse komponenter, gældende for alle påkrævede modeller.

Anlægsejeren skal, fra HVDC-anlæggets 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 HVDC-anlæg.

For et eksisterende HVDC-anlæg, hvor der foretages ændringer af HVDC-anlæggets 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 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 (herunder kortslutningsforhold) i tilslutningspunktet for det kollektive elforsyningsnet 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 HVDC-anlæggets 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 relation til anvendte målepunkter, deres måleenheder og anvendte baseværdier for disse.
- En samlet parameterliste, hvor alle parameterverdier skal kunne genfindes i de medfølgende datablade for hovedkomponenter, blokdiagrammer og overføringsfunktioner m.m.
- Beskrivelse af opsætning og initialisering af simuleringsmodellen samt eventuelle begrænsninger for anvendelsen af denne. Herunder nøjagtigheden af modellen, fx under hensyntagen til båndbredde; nøjagtigheden skal dokumenteres ved en sammenligning mellem målte data og modeloutput.
- Grænseværdier som maximal trinstørrelse for anvendte ligningsløser, softwareversion, compilerversion m.v.
- 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.

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 HVDC-anlæg. Hvor dette ikke er tilfældet, vil en væsentlig ændring af HVDC-anlægget medføre krav om en komplet og fuldt dokumenteret simuleringsmodel i henhold til denne modelkravspecifikation.

Modelspecifikke dokumentationskrav er beskrevet i de efterfølgende afsnit.

3. Modeltekniske krav

3.1 Krav til stationær simuleringsmodel (stationære forhold og kortslutningsforhold)

Simuleringsmodellen for det samlede HVDC-anlæg skal repræsentere anlæggets stationære og quasi-stationære egenskaber i nettilslutningspunktet, gældende for det i forordningen definerede normaldriftsområde og under alle relevante stationære netforhold, hvorunder HVDC-anlægget skal kunne drives.

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

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

Den stationære simuleringsmodel skal opfylde følgende krav:

- Skal understøttes af modelbeskrivelser, der som minimum indeholder funktionsbeskrivelser af de overordnede moduler i modellen.
- Skal indeholde beskrivelser af de enkelte modelkomponenter og tilhørende parametre.
- Skal indeholde beskrivelser af opsætning af simuleringsmodellen samt eventuelle begrænsninger for anvendelsen af denne.
- Skal indeholde karakteristikker for HVDC-anlæggets stationære driftsområder for aktiv og reaktiv effekt, således at simuleringsmodellen ikke fejlagtigt drives i et ugyldigt arbejds punkt. Dette skal angives i nettilslutningspunktet i det kollektive elforsyningsnet.
- Skal muliggøre anvendelse af samtlige påkrævede reguleringsfunktioner for reaktiv effekt:
 - Effektfaktorregulering ($\cos \phi$ -regulering) med angivelse af referencepunktet.
 - Q-regulering (Mvar-regulering) med angivelse af referencepunktet.
 - Spændingsregulering inklusive parametre for anvendt droop/komponering med angivelse af referencepunktet.
- Skal kunne benyttes til simulering af effektivværdier i de enkelte faser under symmetriske hændelser og fejl i det kollektive elforsyningsnet.
- Skal kunne benyttes til simulering af effektivværdier i de enkelte faser under asymmetriske hændelser og fejl i det kollektive elforsyningsnet.
- Skal 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.
- Hvis HVDC-anlægget har særlige funktioner, som eksempel et reguleringsregime for særligt svagt net, skal disse funktioner inkluderes i den stationære model.

Simuleringsmodellen for HVDC-anlægget skal have et indhold og et detaljeringniveau, så den umiddelbart kan integreres i en større net- og systemmodel af det kollektive elforsyningsnet, 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 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 3.2 beskrevne dynamiske simuleringsmodel, bortfalder kravet om en separat stationær simuleringsmodel.

Simuleringsmodellen skal verificeres, som specificeret i afsnit 4.

3.1.1 Nøjagtighedskrav

Simuleringsmodellen må ikke vise egenskaber, der ikke kan påvises for det fysiske HVDC-anlæg.

3.2 Krav til dynamisk simuleringsmodel (RMS-model)

Den dynamiske simuleringsmodel for det samlede HVDC-anlæg skal repræsentere anlæggets stationære og dynamiske egenskaber i nettilslutningspunktet, gældende for det i forordningen definerede normaldriftsområde og under alle relevante netforhold, hvorunder HVDC-anlægget skal kunne drives. Modellen skal indeholde alle elektriske hovedkomponenter, kontrol- og reguleringsfunktioner.

Modellen skal opbygges som beskrevet i nedenstående (frem til og med afsnit 3.2.3), med mindre der ved aftale om tilslutning kan træffes aftale om andet.

Modellen skal tage hensyn til nedenstående eksterne hændelser - eller kombinationer af disse eksterne hændelser - i det kollektive elforsyningsnet:

- Anlægsnære fejl, set fra nettilslutningspunktet, i henhold til den i forordningen påkrævede FRT-karakteristik, hvor en kortslutning vil antage form som 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, og som minimum indenfor indsvingningsforløbet for HVDC-anlæggets overgang til en ny stationær tilstand.
- Frekvensforstyrrelser med en varighed indenfor den påkrævede minimumssimuleringsperiode, jf. nedenstående, og som minimum indenfor indsvingningsforløbet for HVDC-anlæggets overgang til en ny stationær tilstand.

- Aktivering af et potentielt pålagt systemværn (via et eksternt indgangssignal) til hurtig regulering af HVDC-anlæggets aktive effektudveksling i henhold til en foruddefineret slutværdi og gradient.

Den dynamiske simuleringsmodel skal opfylde følgende krav:

- 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.
- Skal indeholde beskrivelser af, og tilhørende parametre for, de enkelte modelkomponenter, herunder mætning, ulinearitet, dødbånd, tidsforsinkelser og begrænserfunktioner samt opslagstabelfdata og anvendte principper for interpolation m.m.
- Skal indeholde beskrivelser og entydige angivelser af simuleringsmodellens indgangs- og udgangssignaler, hvor dette som minimum skal omfatte følgende²:
 - Aktiv effekt
 - Reaktiv effekt
 - Frekvensregulering
 - Runback
 - Setpunkter for regulering af følgende:
 - Aktiv effekt
 - Effektfaktor ($\cos \phi$ -regulering)
 - Reaktiv effekt
 - Spænding, inklusive parametre for anvendt droop/compoundering
 - Frekvens (statik og dødbånd)
 - Systemværnsindgreb (slutværdi og gradient for regulering af aktiv effekt)
 - Emergency Power Control (EPC-P)
 - Emergency Reactive Power Control (EPC-Q)
 - Power Oscillation Damping (POD)
 - Reactive power oscillation damping
 - Dødstart af det kollektive elforsyningsystem
 - Signal for aktivering af systemværn
 - Styresignaler for eventuelle eksterne netkomponenter, fx STATCOMs eller energilagringenheder m.m.
- Skal indeholde beskrivelser af opsætning og initialisering af simuleringsmodellen samt eventuelle begrænsninger for anvendelsen af denne.
- Skal indeholde samtlige i forordningen påkrævede reguleringsfunktioner.
- Skal indeholde 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.
- Skal indeholde samtlige kontrolfunktioner³, som kan aktiveres ved alle relevante hændelser og fejl i det kollektive elforsyningsnet.
- Hvis HVDC-anlægget har særlige funktioner - som eksempel et reguleringsregime for særligt svagt net - skal disse funktioner inkluderes i RMS-modellen. En relevant mo-

² Såfremt dette er inkluderet i leverancen af det fysiske HVDC-anlæg.

³ Kontrolfunktioner i relation til HVDC-anlæggets pålagte fault ride-through-egenskaber, herunder dynamisk spændingsstøtte i forbindelse med et spændingsdyk.

delteknisk beskrivelse af de særlige funktioner og disses begrænsninger skal inkluderes i RMS-modellens brugervejledning.

- Skal indeholde karakteristikkere for HVDC-anlæggets stationære og dynamiske driftsområder for aktiv og reaktiv effekt, således at simuleringsmodellen ikke fejlagtigt initialiseres og drives i et ugyldigt arbejds punkt. Dette skal angives i nettilslutningspunktet for det kollektive elforsyningsnet.
- Skal 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.
- Skal 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.
- Skal kunne beskrive HVDC-anlæggets dynamiske egenskaber i mindst 60 sekunder efter enhver af ovenstående setpunktsændringer og eksterne hændelser i det kollektive elforsyningsnet.
- Skal 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.
- Skal kunne udnytte numeriske ligningsløserne med variabelt tidsskridt (i intervallet 2 til 5 ms).
- Skal være numerisk stabil ved et momentant vektorspring på op til 20 grader i nettilslutningspunktet.
- Må ikke indeholde krypterede eller kompilerede dele, 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. Tilsvarende er anlægsejer ansvarlig for at supportere ved opdateringer, hvis det findes, at simuleringsmodellen ikke modsvarer virkeligheden efter anlæggets opførelse.

Simuleringsmodellen for HVDC-anlægget skal have et indhold og et detaljeringniveau, så den 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 HVDC-anlægget 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 DlgSILENT PowerFactory ved anvendelse af de indbyggede netkomponentmodeller og standardprogrammeringsfunktioner (makroer), 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 lig-

ningsløser 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.

3.2.1 Nøjagtighedskrav

Simuleringsmodellen skal repræsentere HVDC-anlæggets 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 i forordningen påkrævede overensstemmelsesprøvninger, og skal fremsende den nødvendige dokumentation herfor.

Eftersom modelverifikationen omfatter HVDC-anlæggets stationære og dynamiske egenskaber i forbindelse med eksterne hændelser i det kollektive elforsyningsnet, og tilsvarende i forbindelse med setpunktsændringer for anlæggets udveksling 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 Nøjagtighedskrav i forbindelse med eksterne hændelser i det kollektive elforsyningsnet

Begrebet eksterne hændelser omfatter i denne sammenhæng momentane spændingsændringer, målt i HVDC-anlæggets nettilslutningspunkt, fx i forbindelse med kortslutning af en netkomponent eller i forbindelse med manuel kobling med en netkomponent i det kollektive elforsyningsnet.

Et af formålene med de definerede overensstemmelsesprøvninger er verifikation af HVDC-anlæggets overholdelse af de påkrævede FRT-egenskaber, herunder krav om levering af dynamisk spændingsstøtte (reaktiv tillægsstrøm, I_Q) under fejlforløbet, i henhold til den i forordningen definerede karakteristik. Resultaterne af disse fabrikstests anvendes ved den efterfølgende verifikation af de opstillede funktionskrav til - og nøjagtigheden af - den påkrævede simuleringsmodel.

Simuleringsmodellen må ikke vise egenskaber, der ikke kan påvises for det fysiske HVDC-anlæg.

3.2.3 Nøjagtighedskrav i forbindelse med ændringer af HVDC-anlæggets arbejds punkt

Begrebet ændringer af HVDC-anlæggets arbejds punkt omfatter i denne sammenhæng manuelle ændringer af HVDC-anlæggets stationære arbejds punkt, fx i forbindelse med en setpunktsændring for anlæggets overførsel af aktiv effekt eller tilsvarende ændring af setpunktet for de øvrige påkrævede reguleringsfunktioner. Test og verifikation af et HVDC-anlægs stationære og dynamiske egenskaber i forbindelse med sådanne setpunktsændringer gennemføres typisk i sammenhæng med de i forordningen påkrævede overensstemmelsesprøvninger.

Det primære formål med disse standardtests er verifikation af HVDC-anlæggets overholdelse af de påkrævede stationære og dynamiske egenskaber i nettilslutningspunktet, herunder overholdelse af de definerede krav i forhold til fx reaktionstid og reguleringsgradierter, aktiveringsniveauer for regulerings- og begrænserefunktioner, samt verifikation af HVDC-anlæggets arbejdsområde m.m.

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

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)
- Systemvænsindgreb (slutværdi og gradient for nedregulering af aktiv effekt), hvis pålagt HVDC-anlægget.

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.

Afsnit 4.2.1 angiver, hvilke af HVDC-anlæggets elektriske signaler der er omfattet af ovenstående nøjagtighedskrav.

Simuleringsmodellen må generelt ikke vise egenskaber, der ikke kan påvises for det fysiske HVDC-anlæg.

3.3 Krav til transient simuleringsmodel (EMT-model)

Anlægssejer har til ansvar at levere en transient simuleringsmodel af HVDC-anlægget til den systemansvarlige virksomhed i henhold til nedenstående specifikation:

- EMT-modellen skal udvikles og leveres til PSCAD/EMTDC i den softwareversion, som er fastsat af den systemansvarlige virksomhed.
- EMT-modellen må indeholde prækompilerede og krypterede dele; sådanne dele må dog ikke give anledning til begrænsninger, når den systemansvarlige virksomhed skal implementere modellen i netmodellen af det kollektive elforsyningsnet, hvor der eksempelvis forefindes modeller af de eksisterende HVDC-anlæg. EMT-modellen skal være DLL-baseret og skal kunne benyttes med Intel Fortran fra version 12 til og med senest udgivne version på datoen for kontraktunderskrivning mellem anlægssejer og producenten af HVDC-enheden. Modellen må ikke give anledning til begrænsninger ved versionsopdatering af PSCAD. Der skal anvendes standardkomponenter, der er tilgængelige for den systemansvarlige virksomhed, således at denne kan foretage nødvendige tiltag for at kunne anvende modellen ved fremtidige versioner af PSCAD.
- Simuleringsstartpunkt for påbegyndelse af EMT-modellens injektion af tilsyneladende effekt skal kunne indstilles af brugeren.

- Simuleringstidspunkt for aktivering af HVDC-anlæggets 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 simuleringer med ethvert tidskridt i det gyldige interval. Højeste mulige tidskridt skal angives 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.
- Anlægs ejer skal foretage nødvendige tiltag for at sikre lavest mulige simuleringstid for initialisering af EMT-modellen. Som en del af dokumentationen skal det kvantificeres under hvilke forhold EMT-modellen kan betrages som værende fuldt ud initialiseret.
- EMT-modellen skal repræsentere alle komponenter, reguleringsystemer og beskyttelsessystemer, som er relevante for EMT-analyser.
- Alle de for EMT-analyser relevante⁴ funktionsindstillinger i HVDC-anlæggets reguleringsystem, der kan ændres enten lokalt eller ved fjernkontrol, skal være tilgængelige parametre i simuleringsmodellen. Omfanget af leverancen skal godkendes af den systemansvarlige virksomhed.
- Alle elektriske, regulerings- og beskyttelsesignaler, som er relevante⁴ for EMT-analyser af det kollektive elforsyningsnet, skal være tilgængelige i EMT-modellen. Omfanget af leverancen skal 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.
- EMT-modellen skal modelleres på transistorniveau.
- EMT-modellen skal repræsentere HVDC-anlæggets FRT-egenskaber, som påkrævet i forordningen.
- Hvis HVDC-anlægget har særlige funktioner - som for 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.
- EMT-modellen skal være gyldig for stationære driftsforhold.
- EMT-modellen skal være anvendelig for EMT-simuleringer af balancerede samt ubalancerede fejl og afbrydelse af HVDC-anlæggets forbindelse til det kollektive elforsyningsnet.
- EMT-modellen skal kunne anvendes til dødstartstudier og for \emptyset -drift.

3.3.1 Modelleverance

EMT-modellen skal ved levering bestå af følgende:

- PSCAD/EMTDC-simuleringsmodel (version fastsat af den systemansvarlige virksomhed).
- Brugervejledning med beskrivelse af modelbegrænsninger.
- Verifikationsrapport for EMT-modellen.
- En funktionel PSCAD-simuleringsmodel skal leveres for HVDC-anlægget og skal være forbundet til en simpel modelrepræsentation af det kollektive elforsyningsnet, f.eks. repræsenteret ved en Théveninækvivalent.
- Brugervejledningen skal beskrive modelantagelser og instrukser for anvendelse af EMT-modellen.

⁴ De relevante anlægsspecifikke funktionsindstillinger aftales mellem den systemansvarlige virksomhed og *anlægs ejeren*

- En detaljeret beskrivelse af modelbegrænsninger skal leveres, med beskrivelse af alle de af HVDC-anlæggets funktioner, der ikke er inkluderet i EMT-modellen, og som ville kunne antages at have betydning for HVDC-anlæggets transiente elektriske egenskaber.
- Verifikationsrapporten for EMT-modellen skal indeholde sammenligning af PSCAD/EMTDC-modellens stationære og dynamiske respons med målinger foretaget på det fysiske HVDC-anlæg. Hertil kan anvendes realtidssimulator, hvor det fysiske kontrolsystem er inkluderet. Dette krav omfatter ikke stationære harmoniske forhold.

3.3.2 Nøjagtighedskrav

Nøjagtigheden af den påkrævede transiente simuleringsmodel fastlægges på samme måde som for den dynamiske simuleringsmodel (RMS-model), jf. afsnit **3.1.1**, ved anvendelse af passende filtrering til beregning af grundtonekomponenten af målte og simulerede værdier. Metoden, der anvendes 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.

3.4 Krav til harmonisk simuleringsmodel

Simuleringsmodellen for det samlede HVDC-anlæg skal repræsentere anlæggets emission af harmoniske overtoner og stationære harmoniske respons (frekvensafhængig impedans) i nettilslutningspunktet, gældende for det i forordningen definerede normaldriftsområde og under alle relevante stationære netforhold, hvorunder HVDC-anlægget skal kunne drives.

Den harmoniske simuleringsmodel skal leveres som en Théveninækvivalent, der er repræsentativ for HVDC-anlæggets emission af harmoniske, angivet som RMS-spændinger, samt for 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 en opløsning på 1 Hz. Aktiv emission af heltal og af interharmoniske skal inkluderes i modellen.

Hvis HVDC-anlæggets emission og/eller impedans er afhængig af anlæggets arbejds punkt, skal modellen leveres ved tre arbejds punkter 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. Det er anlægsejerens ansvar at dokumentere afhængighed af arbejds punkt samt at sikre korrekt implementering i modellerne.

3.4.1 Nøjagtighedskrav

Metoden, der er anvendt til opstilling af modellen for HVDC-anlægget, skal specificeres og godkendes af den systemansvarlige virksomhed. Bestemmes modelparametre ved måling, skal anlægsejeren vedlægge en målerapport som dokumentation. Desuden skal der redegøres for, hvordan modelparametre fastsættes ud fra målerapportens resultater. Fastsættes modelparametre ved beregning eller simulering, skal den anvendte metode specificeres, og eksempler på resultatbehandling for udledning af modelparametre gives.

4. Verifikation af simuleringsmodel

Anlægsejeren skal sikre, at simuleringsmodellerne er verificeret jf. forordningen. 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.

Den praktiske udførelse af fabrikstestene skal ske som specificeret i forordningen, hvor omfanget af modelverifikationen fastlægges i samarbejde med den systemansvarlige virksomhed, efter oplæg fra anlægsejeren.

Anlægsejeren skal dokumentere de målinger, der er anvendt til verifikation af simuleringsmodellen for HVDC-anlægget, 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.

4.1 Verifikationskrav til stationær simuleringsmodel (stationære og kortslutningsforhold)

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

4.2 Verifikationskrav til dynamisk simuleringsmodel (RMS-model)

Simuleringsmodellen skal verificeres af anlægsejeren for det samlede HVDC-anlæg, omfattende samtlige påkrævede reguleringsformer og eftervisning af HVDC-anlæggets stationære og dynamiske egenskaber ved påtrykning af de i afsnit 3.2 beskrevne setpunktsændringer og eksterne hændelser i det kollektive elforsyningsnet.

Modelverifikationen sker på baggrund af måleresultater, som er optaget i forbindelse med gennemførelsen af fabrikstest og eventuelt ved HVDC-anlæggets idriftsættelse eller ved kombination af disse, således at de opstillede funktionskrav til - og nøjagtigheden af - den påkrævede simuleringsmodel kan verificeres.

4.2.1 Påkrævet signalomfang ved verifikation af HVDC-anlæg

Som minimum skal følgende målesignaler optages i forbindelse med de gennemførte fabriks-tests og den gennemførte overensstemmelsesprøvning ved HVDC-anlæggets 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

- Modulationsindex
- Kontrolsignaler (indikatorer) for aktivering af fault ride-through-funktioner
- Setpunkter for:
 - Aktiv effektregulering
 - Effektfaktorregulering ($\cos \phi$ -regulering)
 - Q-regulering (Mvar-regulering)
 - Spændingsregulering
 - Frekvensregulering.
- Signal for aktivering af systemværn.

4.3 Verifikationskrav til transient simuleringsmodel (EMT-model)

Identisk med verifikationskrav til RMS-model, jf. afsnit 4.2.

4.4 Verifikationskrav til harmonisk simuleringsmodel

Intet krav om modelverifikation.