

2025-05-16

INFORMATION

Överensstämmelse av POD

Inledning

Detta dokument inkluderar Svenska kraftnäts generella krav vad gäller POD samt beskriver uppdatering och utbyte av kapitlen avseende effektpendlingsdämpning (POD – Power Oscillation Damping) i de befintliga bilagorna, specifikt kapitel 4.5 och 4.6 i

- > SvK 2021/5426, "Kraftparksmodul: Bilaga 5", (Nätanslutning av generatorer (RfG), September 2024)

och kapitel 2.16 i

- > SvK 2021/5426, "Kraftparksmodul: Bilaga 6", (Nätanslutning av generatorer (RfG), September 2024).

Detta dokument kommer tillsvidare vara fristående till dess att det kan inarbetas i de ovan nämnda bilagorna.

För kraftparksmoduler delas POD-kraven in i två kategorier:

- > POD-Q, modulering av reaktiv effekt baserad på lokal spänningsamplitud.
- > POD-P, modulering av injicering aktiv effekt baserad på lokal spänningsfrekvens.

Detta dokument avser endast överensstämmelsetestning av POD-Q-funktionen.

För frågor angående detta dokument eller utbyte av digitala modeller, vänligen kontakta anslutningskoder@svk.se, eller NDB@svk.se avseende specifika modellfrågor.

**RfG**

Artikel 21.3. Kraftparksmoduler av typ C ska uppfylla följande ytterligare krav avseende spänningsstabilitet:

f) När det gäller dämpningsreglering av effektpendlingar ska en kraftparksmodul kunna bidra till att dämpa effektpendlingar om detta anges av den berörda systemansvarige för överföringssystemet. Kraftparksmodulens regleringskaper när det gäller spänningen och reaktiv effekt får inte inverka negativt på dämpningen av effektpendlingar

RfG, ACER Recommendation 2023

Article 21.2. Type C power park modules shall fulfil the following additional requirements in relation to voltage stability:

f) with regard to power oscillations damping control, if specified by the relevant TSO a power park module shall have a power oscillation damping function which, through the control of the active power, reactive power, or both, helps to attenuate the power oscillations. The power oscillation damping shall be able to damp inter-area oscillations in the range of, at least, 0,1 Hz – 1,0 Hz. The voltage and reactive power control characteristics of power park modules must not adversely affect the damping of power oscillations.

Article 22.2. With regard to power oscillations damping control, type D power park modules shall have a power oscillation damping function which helps to attenuate the power oscillations through the control of the active power, reactive power, or both. The power oscillation damping shall be able to damp inter-area oscillations in the range of, at least, 0,1 Hz – 1,0 Hz. The relevant TSO in co-ordination with the relevant system operator shall have the right to request and approve the tuning of the power oscillation damping by the power-generating facility owner to damp the inter-area oscillation mode based on frequency ranges specified by the relevant TSO in coordination with adjacent TSO or TSOs. The relevant TSO shall have the right to request the tuning of the power oscillation damping by power-generating facility owner to damp the local oscillation mode, in which the power park modules is oscillating against the network.

The proposed power oscillation damping control shall be approved by the relevant TSO.

Svenska kraftnäts generella krav

Med hänvisning till artikel 14.5.a, när det gäller reglerprinciper och inställningar, ställer Svenska kraftnät följande krav på effektpendlingsdämpning:

Kraftparksmoduler av typ C och D ska vara försedda med dämpfunktion för dämpning av effektpendlingar. POD-funktionen ska vara aktiverad enligt EIFS 2018:2 5 kap 7 §. POD-funktionen ska vara stabil och aktivt dämpa effektpendlingar inom frekvensintervallet 0,25-1 Hz.

POD-funktionen ska implementeras som reglering av aktiv effekt via återkoppling av lokal frekvens (POD-P), eller som reglering av reaktiv effekt via återkoppling av lokal plusföljdsspänning (POD-Q).

Ägaren av kraftparksmodulen ska komma överens med Svenska kraftnät angående mätsignaler samt utformning och inställningar för POD-funktionen. Svenska kraftnät önskar, om möjligt, att POD-P implementeras. Om detta inte är möjligt får POD-Q enbart användas om det tydligt motiveras varför POD-P inte är möjligt att använda ur teknisk synpunkt.

- > POD-Q ska ha förmågan att dämpa effektpendlingar i frekvensintervallet 0,25-1 Hz då uppmätt spänning är i spänningsintervallet 95-105 %, om inte annat överenskommits med Svenska kraftnät. Det dämpande bidraget från POD-Q ska vara kontinuerligt tillgängligt i det kravställda spänningsintervallet.



- > Spänningsreglering och snabb felströmsinmatning ska vara implementerade på sådant sätt att de inte motverkar funktionen hos POD-Q i det krävda spänningsintervallet.
- > POD-P ska ha förmågan att dämpa effektpendlingar i frekvensintervallet 0,25-1 Hz. Frekvensreglerande funktioner, så som FSM, LFSM, och syntetisk tröghet, ska vara designade så att de tillsammans med funktionen för POD-P dämpar effektpendlingar i frekvensintervallet 0,25-1 Hz. Det dämpande bidraget från POD-P ska vara kontinuerligt tillgängligt.
- > Både POD-P och POD-Q ska kunna aktiveras och deaktiveras vid instruktion från Svenska kraftnät (exempelvis vid nätåteruppbyggnad eller ö-drift).
- > Både POD-P och POD-Q ska utformas med en linjär regulator. Olinjära element så som mättnads- och ramphastighetsbegränsare får förekomma, exempelvis för att skydda kraftparksmodulens hårdvara. Användning av olinjära element i regulatorn ska motiveras och godkännas av Svenska kraftnät. Om en olinjär regulatordesign används med syfte att uppnå bättre POD-funktionalitet ska motiveringen särskilt innehålla en beskrivning av påverkan på prestanda och robusthet hos POD-funktionen.
- > *Kontinuerligt tillgänglig* avser att POD-funktionen ska vara utformad för att kunna vara aktiverad på obestämd tid under normal drift. POD-funktionen kan behöva begränsas vid extrema driftfall, exempelvis av säkerhetsskäl hos kraftparksmodulen. En sådan begränsning bör implementeras på ett sådant sätt att det inte medför risk för effektpendlingar.
- > POD-funktionen kan med fördel implementeras som en kombination av POD-P och POD-Q.
- > Det ska finnas möjlighet att från Svenska kraftnäts driftcentral, berörd systemansvarigs driftcentral, eller kraftparksmodulsägarens driftcentral, aktivera och deaktivera PSS eller POD. Beordrade ändringar ska kunna verkställas inom 15 minuter.



POD-Q – Reaktiv effektpendlingsdämpning

Referens till befintlig nätkod

- > RfG: Sektion 2, kapitel 3, artikel 21.3.f
- > EIFS 2018:2: 5 kap, 7 §

Bakgrund

Kraftparksmoduler (KPM) har åverkan på dynamiken i kraftsystemet. Medans dynamiken hos synkrona kraftproduktionsmoduler i stort beror på de fysiska egenskaperna hos kraftproduktionsmodulen, beror dynamiken från kraftparksmoduler i större utsträckning på designval vid utformning av kraftparkmodulens olika styrsystem. Samtidigt omfattas designen ofta av sekretess på grund av intellektuell egendom. Detta försvårar förutsägbarheten i hur kraftparksmoduler kommer att påverka dynamiken i kraftsystemet. Proceduren i detta dokument ska användas för att pröva de dynamiska egenskaperna hos kraftparksmodulens spännings- och reaktiva effekttreglering för att säkerställa att den har stabiliserande inverkan på effektpendlingar i frekvensintervallet 0,25-1 Hz.

Simuleringsstudien delas in i två delar:

- > Del ett utgörs av en simulering av POD-Q och olika reaktiva reglermoder (spänning/reaktiv effekt/konstant effektfaktor) i ett odämpat testsystem.
- > Del två utgörs av ett open-loop frekvenssvarstest av reglerfunktionen för POD-Q.
 - Del två (dvs open-loop frekvenssvarstestet) ska upprepas i ett fysiskt test inför slutgiltigt driftsmeddelande (FON)

Del ett: Simulering i ett odämpat testsystem

Syfte med simuleringen

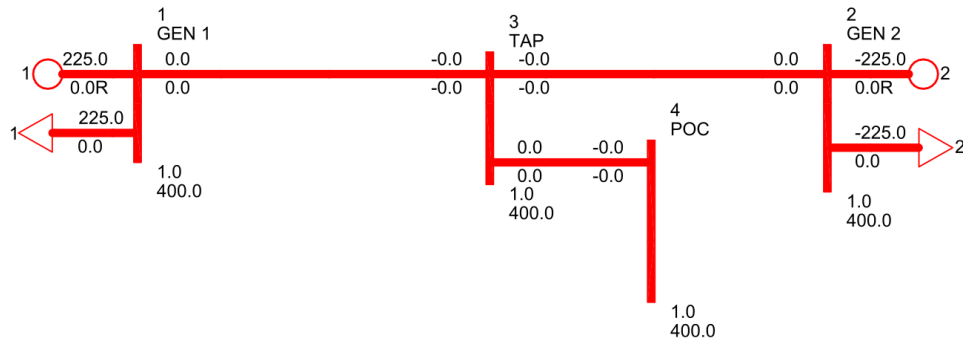
Syftet med simuleringen är att visa att kraftproduktionsmodulen är utrustad med en POD-funktion som bidrar till positiv dämpning av oscillationer med egenfrekvens i intervallet 0,25-1 Hz (periodtid om 4-1 sekunder). Huvudsyftet med reglerfunktionen POD-Q är att kompensera för den destabiliserande åverkan spänningsreglering kan ha på inter-areamoder, särskilt kraftparksmodulens egen spänningsreglering. Kraftparksmodulen ska också bidra nettopositivt till effektpendlingsdämpning generellt, varför POD-Q ska bidra oavsett reglermod för reaktiv effekt eller spänning.

- > Simuleringar ska utföras, redovisas, och godkännas innan tillfälligt driftsmeddelande (ION), och valideras inför FON (om ändringar har utförts i reglerdesignen).



Instruktioner för simulationer

Simuleringen utförs i ett odämpat testsystem som tillhandahålls av Svenska kraftnät, se Figur 1 nedan. Vid behov kan modellen skalas för att passa kraftparksmodulens märkeffekt. Syftet är inte att utföra en fullständig



Figur 1 Simuleringsmodell för validering av POD-funktionen i en kraftparksmodul.

systemstudie. En anslutning till ett, för anslutningsnivån, tillräckligt starkt nät och ett högt X/R-förhållande är tillräckligt för denna studie.

Kraftproduktionsmodulsägaren ansluter kraftparksmodulen, inklusive alla eventuella uppsamlingsnät och transformatorer, till bus 4.

Kortslutningsförhållandet (eng. short circuit ratio) och X/R-förhållandet vid anslutningspunkten kan ändras genom att justera impedansen mellan bus 3 och 4. Kortslutningsförhållandet bör justeras till det lägsta förväntade värdet i anslutningspunkten.

I testsystemet har generatorerna 1 och 2 samma märkeffekt och tröghet. Denna studie är tänkt att illustrera det dämpande bidraget av kraftparksmodulens spännings-/reaktiva effekthereglering. Bus 3 bör därför placeras i den elektriska mittpunkten mellan generatorbussarna 1 och 2, då detta maximerar observerbarheten och styrbarheten av den V-Q-parade POD-Q-regleringen. Notera att både observerbarhet och styrbarhet av den V-Q-parade POD-Q-regleringen är proportionell mot effektförflödet mellan bus 1 och 2. Ett högre effektförflöde kommer därför innebära synligare resultat i simuleringsmodellen. Om så behövs (till exempel för att snabba upp simuleringstider) kan effektförflödet ökas genom att justera effekttinställningarna i generatorerna 1 och 2, samtidigt som de ska hållas lika.

En odämpad effektpendling skapas genom att samtidigt koppla bort lasterna från bus 1 och 2. Egenfrekvensen (eller periodtiden) av pendlingen kan ändras genom att variera tröghetskonstanten i de två generatorerna.

- > Simuleringar ska utföras i system med inter-areamoder med egenfrekvenser 0,25 och 1 Hz (periodtider 4 och 1 s)



- > Simuleringar ska utföras med och utan kraftparksmodulen ansluten för att visa kraftparksmodulens dämpande bidrag.
- > Simuleringar ska utföras med alla implementerade reglermoder för reaktiv effekt.
- > Alla ändringar i simuleringsmodellen ska dokumenteras.

Resultat av simuleringar

Simuleringen ska anses godkänd om:

- > Kraftparksmodulen aktivt förbättrar dämpning av inter-areamoder med egenfrekvenser i intervallet 0,25-1 Hz (åtminstone för reglermoder där POD-Q är aktivt). Uppfyllnad av kravet redovisas genom att mäta rotorvinkelskillnaden mellan generatorerna vid bus 1 och 2, spänningen vid bus 4, såväl som den aktiva och reaktiva effekten injicerad av kraftparksmodulen.
- > När simuleringen utförs ska effektpendlingsdämpningen förbättras när POD-Q-funktionen är aktiverad i jämförelse med simuleringar då POD-Q-funktionen är deaktiverad.

Del två: Open-loop frekvenssvarstest

Syfte med prov och simulering

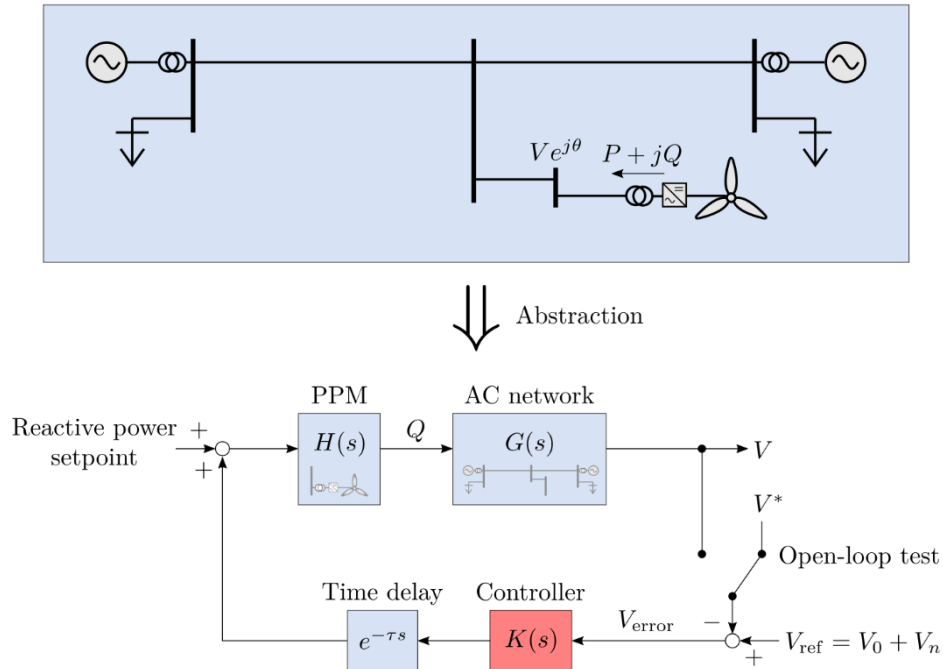
Syftet med detta provningsförfarande, med tillhörande simulering, är att visa att den modellerade POD-Q-regleringen uppfyller fasvinkelkraven och att de simulerade resultaten motsvarar de vid prov uppmätta svaren i POD-Q-regleringen. Detta provningsförfarande antar att kraftparksmodulen är designad för att spännings- och POD-Q-reglerfunktionerna kan testas i open-loop och att kraftparksmodulen är utrustad med en snabb intern strömregulator som låter kraftparksmodulen följa ändringar hos börvärdet för reaktiv effekt med tillräckligt hög bandbredd, för små ändringar runt driftpunkten. Spännings- och POD-Q-regleringen modulerar sedan börvärdet för reaktiv effekt.

- > Simuleringar ska utföras, redovisas, och godkännas innan tillfälligt driftsmeddelande (ION), med de effektnivåer som planeras under provning. Resultatet från simuleringen ska användas som utgångsläge för provning. Inför FON ska POD-Q testas på plats. Provningsförfarandet ska följa samma förfarande som i den utförda simuleringen.
- > Kvalitativ modellvalidering ska demonstrera någorlunda bra överensstämmelse mellan simulerade och provade resultat. Simuleringen ska därför utföras under snarlika driftförhållanden som förväntas under det motsvarande provningsförfarandet.



Instruktioner för prov och simuleringar

Dessa instruktioner beskriver ett open-loop frekvenssvarsprov för funktionaliteten i POD-Q-regleringen. Ett exempel för testsystem illustreras i blockdiagrammet i Figur 2 nedan.



Figur 2 Blockdiagram som illustrerar provningsutförandet för open-loop. Denna illustration visar testsignalen V_n tillförd på referenssignalen. Andra implementationer tillåts så länge det är tydligt hur testsignalen påverkar felet i spänningssignalen, V_{error} .

Syftet med provet är att bestämma småsignalsbeteendet hos kraftparksmodulens spännings- och POD-Q-reglering genom att testa dess frekvenssvarskaraktäristik. I utförandet som presenteras i Figur 2 är funktionen av intresse:

$$H(s)e^{-\tau s}K(s) \quad (1)$$

Där överföringsfunktionen $H(s)$ representerar dynamiken i kraftparksmodulen (dess förmåga att följa börvärdet för reaktiv effekt), $e^{-\tau s}$ representerar summan av alla tidsfördröjningar i reglerloopen och $K(s)$ är spännings- och/eller POD-Q-regleringen som ska ställas in och testas.

Då detta är ett open-looptest har växelspänningsnätverket, $G(s)$, liten påverkan på resultatet. Resultatet från simuleringen och provningsförfarandet kan därför jämföras utan en detaljerad eller precis nätmodell. För kontinuitet rekommenderas att samma testsystem som i "Del ett: Simulering i ett odämpat testsystem" används.

Simuleringar utförs i open-loopsystemet genom att applicera en sinusformad signal



$$V_n(t) = 0.02 \times \sin\left(\frac{2\pi}{T_n} \times t\right)$$

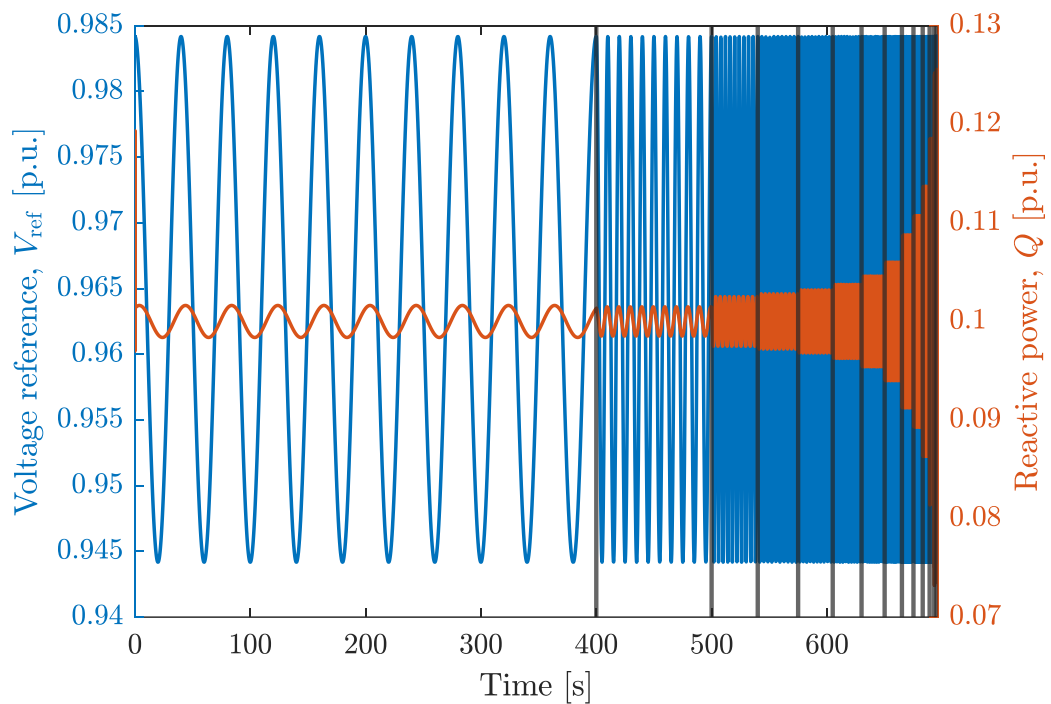
för att modulera mätfelet $V_{\text{error}}(t)$. Spänningsfelet sett av spännings- och POD-Q-regulatorn blir då

$$V_{\text{error}}(t) = -V^* + V_0 + V_n(t)$$

Där V^* är den uppmätta spänningen vid begynnelsetiden då loopen öppnas och V_0 är referensspänningen vid initiering av testet.

- > Den sinusformade testsignalen, $V_n(t)$, kan appliceras till mätsignalen eller till referenssignalen så länge det är tydligt hur testsignalen påverkar spänningsfelet. I beskrivningen av provningsförfarande ska det vara tydligt om positiv eller negativ återkoppling används.
- > Filterdynamik och eventuella tidsfördröjningar associerade med mätning eller kommunikation måste inkluderas i testet.

Den reaktiva effekten ska mätas och plottas mot spänningsreferensen, som visat i Figur 3. De sinusformade variationerna $V_n(t)$ ska ha amplitud 0,02 p.u. Periodtiden T_n ska varieras så att frekvenssvaret åtminstone täcker ett decennium under och ett decennium över det tilltänka POD-frekvensintervallet. Till exempel, om det



Figur 3 Open-loop frekvenssvar hos kraftparksmodulen i spännings- och POD-Q-reglermod. En sinusformad variation är applicerad på spänningsreferensen som beskrivs i Tabell 1.



tilltänka POD-frekvensintervallet är 0,25-1 Hz (periodtid 4-1 s) ska frekvenssvepet täcka frekvenser i intervallet 0,025-10 Hz (periodtid 40-0,1 s).

Tabell 1 Sinusformad variation av referensspänningsvärdet tillfört kraftparksmodulen

Steg	Sinusformad variation av referensspänning
Steg 1	Tillför en sinusformad variation till spänningsreferensen med en amplitud om 0,02 p.u. och periodtid 40 s. Den sinusformade signalen ska vara aktiv tills systemet är stationärt, d.v.s. den realiserade reaktiva effekten varierar sinusformat med konstant amplitud.
Steg 2	Ändra periodtiden till 10 s. Den sinusformade signalen ska vara aktiv tills systemet är stationärt.
Steg 3	Ändra periodtiderna på samma sätt som i steg 2 för periodtiderna: 4, 3,5, 3, 2,5, 2, 1,5, 1, 0,8, 0,6, 0,4, 0,2, och 0,1. Innan periodtiden ändras ska systemet vara stationärt.

- > Om simuleringen inför ION visar att en amplitud om 0,02 p.u. är för stort ska simuleringarna utföras med en amplitud som motsvarar den amplitud som bedöms säker vid provningsförfarandet. Om amplituden minskas ska detta motiveras.
- > Inför FON ska simuleringar ha utförts med samma amplitud som vid provning.
- > Simuleringar ska ha utförts med alla implementerade reglermoder för spänning och reaktiv effekt.
- > Simuleringar ska utföras inför ION och FON.

Resultat av provning och simuleringar

En beskrivning av provningsförfarandet och reglerkonfigurationen ska bifogas provrapporten. Resultatet från frekvenssvarstestet ska presenteras i ett Bodediagram.

Resultat av prov och simuleringar ska anses godkända om:

- > Spänningsreferensen och den reaktiva effekten plottas för att visa de simulerade och uppmätta frekvenssvarstesterna.
- > Resultatet av open-loop frekvenssvarstestet presenteras i ett Bodediagram där den reaktiva effekten som funktion av spänning (QfV), med förstärkning och fasförskjutning för varje sinusformad frekvens, visas.
- > Fasförskjutningen hos QfV i open-loop är mellan 0 och +90 grader (förutsatt negativ återkoppling) i frekvensintervallet 0,25-1 Hz.
- > Om fasförskjutningen understiger -180 grader ska förstärkningen justeras så att förstärkningsmarginalen är minst 2, om ingen annan stabilitetsfaktor



kräver att marginalen är högre. Det förutsätts att open-loopfunktionen (1) är given i p.u. effekt/p.u. spänning, där baseffekten är märkeffekten hos kraftparksmodulen. Förstärkningen i växelspänningsnätverket antas vara $1/S_{SCR}$, där S_{SCR} (p.u. effekt/p.u. spänning) är det lägsta kortslutningsförhållandet som förväntas i anslutningspunkten.

- > Simuleringar inför både ION och FON är utförda vid de effekter som planeras vid provning.
- > Simuleringar och tester är utförda inför FON. Någorlunda bra kvantitativ överensstämmelse mellan simulerade och uppmätta resultat har visats.

Exempel

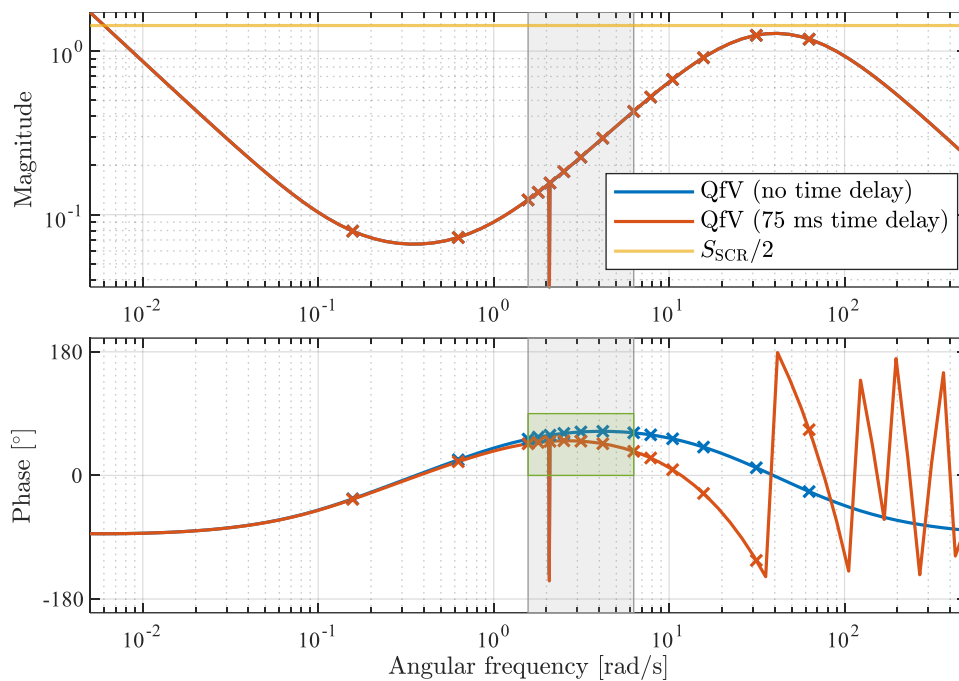
Figur 4 visar QfV-frekvenssvaret från kraftparksmodulen simulerad i Figur 3. Det grönskuggade området täcker frekvensintervallet 0,25-1 Hz och fasvinkelintervallet 0 till +90 grader. Frekvenssvaret hos kraftparksmodulen ligger inom det gröna området och har således godkänt resultat.

- > Notera att den linjäriserade modellen (kontinuerliga blå/röda linjer i Figur 4) visar resonans runt 0,33 Hz. Anledningen till detta är att två-maskinsystemet är marginellt dämpat (0,0 % dämpning). Inter-areamoden dyker därför också upp i kraftparkens funktion ($H(s)$ i Figur 2) då den interna strömregulatorn interagerar med växelströmsnätverket. Detta visar att kraftparksmodulens strömregulator också kommer ha en liten inverkan på POD-funktionen. Detta har dock liten inverkan på resultatet. I slutändan är denna inverkan försumbar i jämförelse med spännings- och POD-Q-reglering. Notera att denna figur endast illustrerar att den interna strömregulatorn kommer att påverka POD-funktionen. Denna effekt är dock ytterst marginell. Det är osannolikt att denna resonans syns i praktiken om växelströmsnätet har en dämpkonstant större än 0,0 % innan anslutning av kraftparksmodulen.
- > Förstärkningen i POD-Q-funktionen är inställd sådan att förstärkningen i QfV har en magnitud under $S_{SCR}/2$ för vinkelfrekvenser $\omega > 0.25$ Hz (eller $\omega > 1.57$ rad/s). Med antagandet att förstärkningen i växelströmsnätet $|G(j\omega)| \approx 1/S_{SCR}$, resulterar detta i att förstärkningsmarginalen är runt 2 om vi modellerar en kraftparksmodul med 75 ms tidsfördröjning i QfV-regleringen (röd linje i Figur 4).
- > Tidsfördröjningar kommer att manifestera sig som sjunkande fas vid högre vinkelfrekvenser då fasvinkeln i en tidsfördröjning $\angle e^{-j\omega\tau} = -\omega\tau$. I Figur 4 kan detta observeras som sågtandsmönstret i fasplotten för vinkelfrekvenser $\omega > 30$ rad/s. För att kunna förbättra stabiliteten hos inter-areamoder upp till 1 Hz blir den största möjliga tidsfördröjningen

$$\tau < \frac{1}{1.0 \text{ Hz} \times 2\pi} < 160 \text{ ms.}$$



För att ha någon stabilitetsmarginal behöver tidsfördröjningen vara avsevärt lägre än denna gräns. I detta simuleringsexempel valdes 75 ms tidsfördröjning. Detta medför en rimlig stabilitetsmarginal för inter-areamoder upp till 1 Hz. Bodediagrammet som erhöles från det experimentella frekvenssvaret, exemplifierat i Figur 4, visar om kraftparksmodulens reglering (inklusive tidsfördröjningar) är acceptabel eller ej. Den relevanta egenskapen hos tidsfördröjningen (den fasförskjutande egenskapen) testas experimentellt. Tidsfördröjningar innebär en fundamental begränsning för den uppnåbara reglerprestandan. Det är i viss utsträckning möjligt att kompensera för tidsfördröjningens fasförskjutning genom att använda fasavancerande leadfilter. Detta kommer däremot öka förstärkningen vid högre frekvenser och göra det svårare att uppfylla kravet för förstärkningsmarginal.



Figur 4 Bodediagram som visar den öppna loopen (open-loop), QfV, frekvenssvar hos kraftparksmodulen. De kontinuerliga linjerna visar Bodediagrammet hos det linjäriserade reglerblocket med tidsfördröjning (röd) och utan tidsfördröjning (blå). De diskreta x:en visar resultaten från det motsvarande experimentella frekvenssvaret. Det simulerade frekvenssvaret av QfV-funktionen med 75 ms tidsfördröjning visas i Figur 3. Förstärkningen och fasförskjutningen beräknas med en snabb fouriertransformalgoritm (FFT – Fast Fourier Transform).



Revisionshistorik

Revisionsdatum	Revision avser
2025-05-16	Dokument publicerat på Svenska. SVK's generella krav avseende POD infört som förtext. Hänvisning till kapitel bilaga 6 kap 2.17 rättat till bilaga 6 kap 2.16 i inledning.
2025-10-27	Korrigerat magnituden för vinkelfrekvensen