

RISKER I DRIFT AV ELKRAFTSYSTEM OCH KONSEKVENSER AV OLIKA ACCEPTERADE RISKNIVÅER

RAPPORT 2017:412



Risker i drift av elkraftsystem och konsekvenser av olika accepterade risknivåer

Svensk kortversion

LARS ABRAHAMSSON

ISBN 978-91-7673-412-4 | © ENERGIFORSK juni 2017

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Detta projekt startades upp under Riskanalysprogrammet II och godkändes av programstyrelsen för Riskanalys III.

En viktig fråga för elsystemet är risken för transmissionssystemets brister. Denna typ av problem innebär stora kostnader när de inträffar, men lyckligtvis sker dessa inte ofta. Ett sätt att minimera dessa risker är att hålla mycket höga marginaler. Detta är möjligt, men kräver stora investerings- och underhållskostnader eftersom överföringsledningar eller flertalet kraftverk då blir "underanvända". Det övergripande målet är att förbättra forskningen inom detta område och beakta att vissa situationer kan orsaka större problem i jämförelse med andra situationer, det vill säga att vissa situationer innebär större risker än andra, även om de skulle ha lika stor sannolikhet att inträffa. Utöver detta, övervägs utvecklingen av riskerna med tiden. När förändringar sker i systemet, så följaktligen, ändras riskexponeringen.

Lars Abrahamsson från Kungliga Tekniska Högskolan och senare Luleå tekniska universitet, har varit projektledare för projektet. Han har arbetat tillsammans med Lennart Söder som är professor vid KTH och Math Bollen som är professor på Institutionen för ingenjörsvetenskap och matematik, LTU.

Denna rapport finns i en utförligare utgåva på engelska, se rapport 2017:375 Considering risks in power system operation.

Stort tack till följande programstyrelse för all hjälp och vägledning:

- | | |
|---|---|
| • Jenny Paulinder, Göteborg Energi (ordförande) | • Par-Erik Petrusson, Jämtkraft |
| • Lars Enarsson, Ellevio | • Magnus Brodin, Skellefteå Kraft Elnät |
| • Jonas Alterbäck, Svk | • Ola Löfgren, FIE |
| • Hans Andersson, Vattenfall Distribution | • Anders Richert, Elsäkerhetsverket |
| • Kenny Granath, Mälarenergi Elnät | • Carl Johan Wallnerström, Energimarknadsinspektionen |

Följande företag har varit involverade som intressenter för projektet. Ett stort tack för deras värdefulla insatser.

- | | |
|-------------------------------|--|
| • Ellevio AB, | • Skellefteå Kraft Elnät AB, |
| • Svenska kraftnät, | • AB PiteEnergi, |
| • Vattenfall Distribution AB, | • Energigas Sweden, |
| • Göteborg Energi AB, | • Jönköping Elnät AB, |
| • Ellinorr AB, | • Borås Elnät AB, |
| • Jämtkraft AB, | • Föreningen för Industriell Elteknik, FIE |
| • Mälarenergi Elnät AB, | |

Stockholm, Juni 2017

Susanne Olausson
Energiforsk AB
Områdesansvarig Elnät, Vindkraft och Solel

Sammanfattning

Denna rapport sammanfattar ett postdoktorsprojekt, vars långsiktiga mål är att möjliggöra en optimal omfördelning av kraftproduktionen i tertiärregleringen. Tertiärreglering är en manuell aktivering av kraftreserver som görs av systemoperatören, Svenska kraftnät. Regleringen görs på en balansmarknad där olika producenter kan lägga reglerbud. I det Nordiska systemet kan operatörer aktivera bud beroende på pris och var i nätet kraften behövs.

För denna omfördelning av kraftproduktion ska stokastiska modellskattningar av icke kontrollerbar produktion, som vindkraft och solkraft, tillsammans med konsumtionen användas.

I tidigare arbeten har modeller och metoder utvecklats där man bestämmer sig för en högsta acceptabel risknivå för att överskrida någon av elkraftsystemets driftsgränser. Men eftersom vissa driftsgränser är mindre allvarliga än andra finns det behov av att kunna ta hänsyn till olika risknivåer.

Att överskrida en ledings överföringsgräns medför på kort sikt ingen inverkan alls på systemets driftssäkerhet. Att överskrida gränsen för spänningsstabilitet har däremot allvarliga och omedelbara konsekvenser.

Tanken bakom projektet är alltså att olika risknivåer för att överskrida en driftsgräns kan accepteras beroende på typ av driftsgräns och hur långvarigt och omfattande överskridandet av gränsen är.

Här har metoder och modeller tagits fram för ett generellt elkraftsystem. Syftet är att identifiera och ta hänsyn till driftgränser individuellt beroende på grad av viktighet, till skillnad från att klumpa ihop dem. Projektet har också på ett tydligt sätt presenterat befintliga metoder för att förenkla beskrivningen av driftgränserna. Driftsgränserna beskrivs som ytor i nettolastrummet, utan att explicit ta hänsyn till alla tillståndsvariabler. De förenklade ytorna presenteras grafiskt tillsammans med en djuplodande diskussion – bland annat om användbarheten av dem.

Projektet presenterar också vägar framåt efter att ytorna har tagits fram. En ideal väg presenteras i form av en lättförståelig, men icke implementerbar optimeringsmodell. Tre alternativ som på olika sätt försöker efterlikna den ideala modellen, men som går att implementera presenteras också. Här redovisas också ett möjligt och potentiellt bättre alternativ för att införa säkerhetsmarginaler när de förenklade ytorna tas fram.

Resultaten visar att det verkar vara möjligt att skilja på olika driftgränser, och att tillåta olika risknivåer för ett överskridande beroende på konsekvenserna. Det återstår en del arbete med att implementera de föreslagna vägarna framåt.

Resultaten visar också att representationerna av driftsgränser som andragradspolynom uttryckta i nettolaster möjligen inte är tillräckliga för framtida elnät där riktningen av effektlödena varierar kraftigt och nettoproduktionen av

okontrollerbar produktion i lastnoderna är den samma som eller större än den konventionella kontrollerbara produktionen.

För energibranschen innebär olika accepterade risknivåer en möjlighet att minska kostnaderna för tertiärregleringen eftersom man inte behöver ta lika mycket hänsyn till alla driftsgränser. På längre sikt innebär metoden bland annat att framtida elnät med större mängder förnyelsebar produktion kommer att kunna drivas lika säkert som med en enda accepterad risknivå men med mindre behov av investeringar i nya ledningar. För samhället innebär det mindre bundet kapital i elnätet och en billigare drift, vilket gör att offentliga och privata medel kan användas till annat. Att möjliggöra en större mängd förnyelsebar produktion är självklart också bra för miljön.

Summary

This report summarizes a postdoctoral project, whose long-term goal is to enable optimum re-dispatch of power production in tertiary control. Tertiary control is a manual activation of power reserves made by the system operator, Svenska Kraftnät. The control takes place in a balance market where different producers can submit regulation bids. In the Nordic system, operators can activate bids depending on price and the location in the network.

For this re-dispatch of power generation, in the context of this research project, stochastic model estimates of non-controllable production, such as wind power and solar power in conjunction with consumption are used.

Previous work exists, based upon the assumption of a maximum acceptable risk level to exceed any of the power system operation limits. However, as certain operation limits are less severe than others are, there is a need to take into account different risk levels.

To exceed a line transfer limit does not affect the system's operational reliability at all in the short term. However, exceeding the limit of voltage stability has serious and immediate consequences.

The idea behind the project is, therefore, to consider different accepted risk levels for violating and exceeding an operation limit depending on the type of operation limit and the duration and extent of the violation of the limit.

This project has developed methods and models for a general power system. The purpose is to identify and take into account operation limits individually, depending on the degree of importance, as opposed treating any operational limit equally. The project has, in an explanatory manner presented existing methods to simplify the description of operating limits. These methods approximate the operation limit surfaces in the net load space, without explicitly taking into account all state variables. These surfaces are, in the attached full-length report, presented graphically together with an in-depth discussion – including the usefulness of them.

The project also presents ways forward once the surfaces are determined. An ideal approach, in the form of an easy-to-understand, but non-implementable optimization model was proposed and presented. Three alternative, implementable approaches that try to imitate the ideal model – but in different ways – are proposed. Additionally, the project report presents a potentially better alternative for introducing safety margins in the simplified surfaces.

The results indicate the possibility to differentiate between the various operational limits, and to allow different risk levels for exceeding these limits depending on their respective associated consequences. There remains a significant amount of pure implementation work along the proposed roads ahead.

The results also show that the representations of operation limits such as second order polynomials expressed in net loads may not be sufficient for future power

grids where the direction of power flows fluctuates significantly and the net production of uncontrollable production in load busses are similar to or greater than the conventional controllable production in the generator busses.

For the energy industry, different accepted risk levels gives an opportunity to reduce the costs for the tertiary regulation by allowing the operation limits to be treated on an individual basis. In the longer term, the method allows, among other things, that future power grids with larger amounts of renewable production will be able to operate as safe as with “one risk level for all”, but with less need for investments in new lines. For society, it means less bounded invested capital in the grid and a cheaper operation, which allows the use of public and private resources for other purposes. Enabling a greater amount of renewable production is of course also good for the environment.

Innehåll

1	Introduktion	9
1.1	Bakgrund till projektet	9
1.1.1	Projektmotivering	9
1.1.2	Projektskillnader mot det underliggande arbetet	10
1.2	Projektets syfte och omfattning	11
1.3	Tillvägagångssätt	12
1.4	Resultat och bidrag	13
2	Slutsatser	15
3	Citerade verk	21

1 Introduktion

Detta dokument är ett sammanfattande dokument till en längre rapport [1], skriven på engelska som biläggs denna slutrapport.

1.1 BAKGRUND TILL PROJEKTET

1.1.1 Projektmotivering

Med ökade andelar av okontrollerad förnybar kraftproduktion, som vindkraft och solkraft kommer kraftproduktionen att bli svårare att förutsäga och kontrollera med tiden. Också i framtiden, med så kallad smarta hem och med timvis mätningar av elpriser och konsumerad energi, kan man också förvänta sig att konsumtionen blir mer priskänslig och alltså mer tidsvariant [2] [3]. Dessutom förväntas produktionsenheterna att i framtiden vara större i antal, mindre i storlek och mer rumsligt utspridda. Med denna kombination av förändrad struktur och ökade osäkerheter, ökar antalet bortfallssituationer som är relevanta för systemoperatören, eftersom att vilka som är de viktigaste ledningarna, transformatorerna och produktionsenheterna kommer att vara beroende av aktuella produktions- och konsumtionsnivåer. Denna ökade osäkerhet motiverar stokastiska produktions- och konsumtionsmodeller, kombinerat med en generellare behandling av komponentbortfall.

Ett forskningsprojekt initierades vid Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) för att bland annat ta itu med ovan nämnda frågor. Det projektet utvecklade bland annat optimeringsmodeller som minimerar energisystemets kostnader för omfördelning av kraftproduktion under de kommande 15 minuterna (tidsramarna kan variera från land till land, vilket diskuteras i viss mån i [1, Avsnitt 2.5]). I optimeringen används estimeringar av den stokastiska karaktären hos kraftsystembelastningar och generationsnivåer. Dessa modeller minimerar energisystemets kostnader för omfördelning av kraftproduktion under bivillkoret att hålla risknivåerna för att överskrida några av driftsgränserna för systemet under några förutbestämda gränser [4] [5] [6] [7] [8]. Några av resultaten och erfarenheterna av den forskningen utgör i stor utsträckning underliggande arbete och motivation för initieringen av detta projekt.

Iden bakom detta projekt var att planeringen av omfördelning av kraftproduktion för den kommande 15-minutersperioden skulle kunna utföras mer noggrant genom att ta hänsyn till de enskilda riskerna sammanhängande med de olika driftsgränserna och deras respektive svårighetsgrader. Att göra det skulle till exempel kunna tillåta att man accepterar högre risker för att överskrida driftsgränser vilkas överskridande har mindre allvarliga följder, och omvänt en mer konservativ syn på risker för att överskrida gränserna vilka orsakar allvarligare konsekvenser för elsystemet och dess användare. Iden skiljer sig från tillvägagångssättet i det underliggande arbetet, där de accepterade risknivåerna är desamma oavsett vilken allvarlighetsgrad skulle kunna förknippas de olika typerna av driftsgränsöverträdelse. Risk i detta fall innebär sannolikheten för att något är oönskat att hända, exempelvis: att helt och hållet förlora, skada eller

minska tillförlitligheten eller funktionaliteten på elsystemet eller komponenterna i det. Genom att acceptera olika risknivåer för olika allvarighetsnivåer av konsekvenserna kan kostnaderna för omfördelningen av kraftproduktionen minskas utan att nödvändigtvis behöva driva systemet på ett mer riskfyllt sätt.

Skillnader mellan detta projekt och det underliggande arbetet kommer att behandlas i avsnittet som följer.

1.1.2 Projektskillnader mot det underliggande arbetet

Vid den tidigare avdelningen för elkraftsystem vid KTH har modeller som beskriver enveloppen av driftsgränserna för ett elsystem utvecklats för bestämning av optimala driften av kraftsystem med stora andelar av förnybar kraftproduktion, med tanke på stokasticitet i produktion, laster och möjliga bortfall [4] [5] [6] [7] [8]. Ytterligare detaljer finns i sammanfattad form i [1, Avsnitten 2.7.5.2 och 2.7.5.3].

Två kategorier

Projektet i denna rapport skapades som ett slags biproduktsprojekt från [5] av både akademiskt och industriellt intresse som inte kunde prioriteras inom det projektet. I underliggande arbetet (som förefaller vara vanligt i litteraturen) har alla typer av driftsgränser för kraftsystemet behandlats som lika riskabla. I själva verket är det dock inte så. Driftsgränser kan indelas i två huvudkategorier:

- **Kategori ett** Driftsgränser som med stor sannolikhet orsakar instabilitet i systemet, betecknade stabilitetsgränserna (SLer). Sådana behandlas i detalj i [1, Avsnitt 2.2.1]. Dessa kan såklart delas upp i ytterligare underkategorier, men det lämnas som fråga för framtida arbete.
- **Kategori två** För det andra finns de mindre stränga driftsgränserna: för enkelhetens skull, låt driftsgränserna (OLer) beteckna driftsgränser som inte nödvändigtvis är stabilitetsgränser. Dessa behandlas i detalj i [1, Avsnitt 2.2.2]. Ett exempel på vanligen beaktat och relevant OL är (långvarig termisk) överbelastning av en eller flera komponenter (inklusive ledningar). Det följer naturligtvis också att även Oler som en kategori kan delas upp ytterligare, precis som SLer kan.

Svårighetsgraden av en överbelastning (som beskrivs för OL-kategorin ovan) beror på överbelastningstiden, graden av överbelastning, omgivande temperatur och eventuella kylsystem. Konsekvenserna av att överskrida en osynlig (ofta långtids) termisk OL kommer att ligga i det kontinuerliga intervallet från "ingenting", genom försämrad livstid och tidigarelagt framtida utbyte eller reparation av utrustning, till skadad utrustning eller mer sannolikt att enheter i slutändan blir fränkopplade av skyddssystem. En överbelastad ledning som inte blir bortkopplad i tid av skyddssystemet kommer att tendera att hänga ned på grund av materialuppvärmning, och så småningom träffa/vidröra något föremål och därefter sannolikt resultera i ett fel. Efter ett fel kan andra skyddssystem orsaka avbrott.

En bortkoppling är en diskontinuerlig händelse (här, i denna rapports kontext, skulle den bli behandlad som ett bortfall som orsakats av en långvarig OL-överskridelse) som i sin tur alltid leder till en annan, och sannolikt ökad risknivå för systemet. Ett exempel på en signifikant stegökning av risknivån är att plötsligt hamna utanför ett SL i (netto)lastrummet med sett utifrån det stabila området. I ett sådant fall skulle SLen normalt vara en spänningsinstabilitetsgräns (det vill säga bortkopplingen skulle kunna betraktas som en bortfallsinducerad omkopplingsbelastningsgräns (SLL) [1, Avsnitt 2.2.1.2]). Det är rimligt att anta att även andra SLer kan induceras genom en sådan bortkoppling.

Acceptans av olika risknivåer

Projektet handlar om hur man vid den optimala omfördelningen ska kunna skilja mellan olika typer av driftsgränser, det vill säga mellan olika typer av OL eller SL, hur man hanterar dem individuellt och deras respektive risknivåer och grader av farlighet. Modellerna i det underliggande arbetet behandlar inte konsekvenserna av att överskrida en driftsgräns. Idéer om hur det skulle kunna genomföras presenteras i denna rapport, inklusive djupet av gränsöverskridelserna.

1.2 PROJEKTETS SYFTE OCH OMFATTNING

Projektet har (i linje med det underliggande arbetet) varit begränsat till att sträva efter att arbeta med sannolikhetsvillkorade stokastiska optimala effektflöden (SOPF) där kraftsystemet har förenklats konceptuellt och beräkningsmässigt genom att minska modellstorleken genom att arbeta i (netto)belastningsrummet snarare än i tillståndsrummet. Driftsgränssytorna är förenklade som polynom i lastrummet. Det är viktigt att dessa ytapproximationer kan uttryckas i relativt enkelt och i slutna form. Det förklaras varför i [1, Avsnitt 2.3 och 2.4]. Projektet är också begränsat till användning av generella algebraiska optimeringsverktyg som underlättar användningen av en mängd olika tillgängliga uppdaterade lösare. Arbetet bakom denna rapport kan indelas i tre huvuddelar:

- Den första delen förklarar de samhälleliga, tekniska och teoretiska bakgrunderna för projektet och de studier som gjorts. Denna del lägger ut grunden som behövs för att välja och utveckla de metoder och modeller som används. I synnerhet de metoder och modeller som behövs för att detektera och korrekt representera ett antal individuella OLER och SLer som skall användas i stokastisk optimal omfördelning av tertiärregleringen.
- Den andra delen presenterar de faktiska antagandena, modellvalen och modellmodifieringar, och metoder som används för att detektera ett antal individuella OLER och SLer. Syftet var att använda ett allmänt algebraiskt optimeringsverktyg för detta, bland andra skäl för att kunna säkerställa tillgång till en mängd olika professionella lösningar från marknaden.
- Den tredje delen betraktar de faktiska numeriska studierna för att finna ett antal individuella OLER och SLer, som approximerar dem med hjälp av polynom i lastrummet och illustrerar dem grafiskt. För möjligheten att grafiskt illustrera dem valdes ett testsystem med tre (netto)lastnoder.

Plottningsytor på mer än tre dimensioner är komplicerat. Den tredje delen innehåller också jämförelsevis detaljerade implementerbara algebraiska optimeringsmodeller, går vidare mot målet att hantera olika accepterade risknivåer beroende på allvarlighetsgraden hos olika Oler och SLer och på omfördelningskostnaderna för att minska dessa risker.

1.3 TILLVÄGAGÅNGSSÄTT

Tillvägagångssättet att ta itu med de tre huvuddelarna av arbetet som introducerades i avsnitt 1.2 har varit att:

- Den första delen av arbete handlade om litteraturstudier. Initialt var undersökningen inriktad på det underliggande arbetet och deras referenser, men med tiden utvidgades studierna. Studierna behövdes för att erhålla bakgrund och relaterad kunskap för att möjliggöra vidare hantering av Oler och SLer individuellt med olika konsekvensnivåer och sannolikheter (risknivåer) – istället för att behandla alla aspekter av riskfylld operation på ett sammanslaget sätt.
- I den andra delen måste antaganden göras för att göra modellerna för elsystemet enklare men fortfarande användbara för projektets syfte. Därefter utvecklades optimeringsmodellen för att finna och identifiera driftsgränsytorerna på ett systematiskt och tillförlitligt sätt. En artikulerad avsikt hos författaren har varit att presentera modellerna och teorin på ett mer begripligt sätt än vad som vanligtvis är fallet i litteraturen. Detta görs för att bredda publiken för ämnet. Modellerna för approximering av OL- och SL-ytorerna presenterades exempelvis med en notation som tydligt och detaljerat beskriver alla partialderivator, vilket gör approximationsmodellerna begripliga för de flesta med civilingenjörsbakgrund.
- Den tredje delen innehåller numeriska studier av att finna, identifiera, approximera och grafiskt illustrera approximationerna av närmaste OL- och SL-ytorerna till en given driftspunkt. Den grafiska representationen gjordes för att underlätta presentation och analys av resultaten. Tredje delen innehåller också en översikt för den föreslagna fortsättningen av arbetet med avseende på tillämpning av de utvecklade individuella ytapproximationerna för optimal produktionsomfördelning i en sannolikhetsvillkorad SOPF. Denna översikt kommer att sammanfattas i listan i slutet av det här avsnittet. Slutligen gavs i tredje delen, baserat på insikter från litteraturstudierna, en föreslagen förbättring av hanteringen av marginaler för konservativa lösningar för användning i framtida kraftproduktionsomfördelningsstudier.

När det gäller den föreslagna översikten gällande hur man använder dessa ytor i syftet att hantera risker för att överskrida olika OL- och SL-ytor, föreslogs tre ömsesidigt oberoende steg som måste numreras/namnges på något sätt i förhållande till ett idealiserat men inte implementerbart tillvägagångssätt [1, Avsnitt 4.2.1]. Det idealiserade tillvägagångssättet är inte

genomförbart, givet bland annat den önskade avgränsningen i att använda allmänna algebraiska optimeringsverktyg, SOPF och sannolikhetsbivillkor.

- Steg 1. Efter att ha bestämt en aggregerad SL-yta och de individuella OL-ytorna kan man tilldela maximala accepterade sannolikheter (risknivåer) för överskridande av dessa respektive ytgränser. Vanligtvis bör gränsvärdet vara signifikant lägre för en SL än för en OL. Ett förslag om hur ett sådant tillvägagångssätt skulle kunna genomföras presenteras i [1, Avsnitt 4.2.2].
- Steg 2. En annan väg framåt kan vara att för SL beakta de åtgärder som behövs för att hålla systemets (återstoder) stabila efter förekomst av en viss SL. Dessa åtgärder är förknippade med olika kostnader. För SLer används diskretisering av de olika nivåerna av nödvändiga korrigerande åtgärder för att uppskatta väntevärdet av de monetära kostnaderna relaterade till SLer från den ideala modellen [1, Ekv. (212)] genom att vikta med motsvarande risknivåer. För OLer kan de monetära kostnaderna för de olika djupen av deras överträdelser uppskattas, även det en diskretisering. Ett förslag om hur ett sådant tillvägagångssätt skulle kunna genomföras presenteras i [1, Avsnitt 4.2.3]. I det föreslagna tillvägagångssättet har händelser innefattande skadad eller bortkopplad utrustning på grund av en OL inte tagits upp. Modellen kan emellertid utökas till att hantera detta genom att inkludera sådana kompletterande distansfunktioner representerande ett skadat system.
- Steg 3. Ett ytterligare förslag presenteras i [1, Avsnitt 4.2.4]. Där diskretiseras (netto)lastrummet och väntevärdet av kostnaderna för varje samplingspunkt i (netto)lastrummet kan beräknas i förväg medan värdena för kostnadsfunktionen mellan samplingspunkterna behöver interpoleras fram.

1.4 RESULTAT OCH BIDRAG

De viktigaste bidrag från denna rapport är:

- Skapandet av en algebraisk generell optimeringsmodell för driftsgränser (OL och SL) i ett givet kraftsystem. En metod som hör ihop med modellen har presenterats, vilken kan hitta de $n \leq m$ närmaste driftgränsytorna i sett från den aktuella driftpunkten för elsystemet, samt för ett m . Om det efter att metoden har använts visar det sig att $n < m$, beror det på att det inte finns mer än n ytor. Det föreslagna tillvägagångssättet, jämfört med exempelvis tillvägagångssätt baserade på första ordningens nödvändiga villkor (FONC'er) eller lagrangiska tillvägagångssätt, är mindre känsligt och beroende av initialvärden på variabler och har en lägre sannolikhet att fastna i lokala optima.
- I den numeriska studien av de 7 närmaste ytorna i IEEE 9-nods-testsystemet [9], med beaktande av termiska ledningsgränser som OL och en enda SNB (på grund av begränsande antaganden) som SL, noterades det att för större avstånd i lastrummet från den nuvarande driftpunkten, är det möjligt att andra ordningens Taylor-approximationer av ytorna inte är tillräckligt noggranna. Det måste

dock undersökas om under vilka omständigheter och hur sannolikt det är att så stora förändringar sker i nettolast inom den avsedda 15-minuts-tidsramen.

- En alternativ metod för marginaler till driftsgränstorna, för att skapa en konservativ representation av driftsgränserna, jämfört med den som föreslås i [5] har föreslagits, men undersöktes inte ytterligare.
- Ett antal stegvis mer avancerade och förbättrade SOPF-modelleringsmetoder har föreslagits för vidare arbete.
- Modeller och teori har presenterats med en notation som åsyftar på att vara så enkel och begriplig som möjligt.
- Som en biprodukt av litteraturöversynen för detta projekt upptäcktes några tvetydigheter i terminologin i området. Ett försök har gjorts för att rätta ut några av dem.

2 Slutsatser

I detta avsnitt listas de viktigaste upptäckterna i en sammanfattad form alternerade med rekommendationer relaterade till upptäckterna.

1. Upptäckt

En generell algebraisk optimeringsmodell som angreppssätt för att hitta uppsättningen av de närmaste (eller viktigaste) driftsgränserna med avseende på den nuvarande driftspunkten har utvecklats. Den kan utökas till att beakta prognoserna för de kommande 15 minuterna. En av fördelarna med en generell algebraisk modell är att den kan användas med olika utbytbara lösningsalgoritmer. Förutsatt att en relevant lösare används, kommer den utvecklade modellen att genom att endast lösa en handfull optimeringsproblem hitta de sökta driftsgränserna. Vissa utmaningar rörande effektiv modellutveckling kvarstår emellertid.

Rekommendation

Djupare studier behövs för att utveckla ännu mer beräkningsmässigt effektiva modeller med tanke på balansen mellan till exempel små men komplicerade optimeringsproblem eller större men enklare. Är det till exempel mer effektivt att bara beakta hela system-Jakobianen, J , och hitta bifurkationer inom den, eller är det att föredra att arbeta också, eller uteslutande med de mindre delmatriserna?

2. Upptäckt

När man letar efter växlingsrelaterade instabiliteter med en generell algebraisk optimeringsmodell uppstår ett antal utmaningar:

- a. Mängderna för tillståndsvariabler såväl som mängderna för de aktiva bivillkoren i elsystemet förändras i storlek och i innehåll. Detta måste hanteras med tanke på både effektiv minnesanvändning och komplexitet.
- b. I ett algebraiskt modelleringsspråk, som GAMS [10] [11], likväl som i analytiska matematiska formuleringar, måste mängdernas storlek och motsvarande delmängders storlekar tydligt deklarerar innan problemet skickas till lösaren. Sålunda kan mängdernas storlekar inte ändras beroende på var i Lösningsrummet lösaren "står" för i iterationer.
- c. I själva verket har alla PU-kurvor inte alltid egenskapen att $\frac{\partial U}{\partial P} < 0$ på övre sidan från bifurkationspunkten. Därför räcker det inte att studera partialderivator av spänning i förhållande till aktiv effektbelastning för att identifiera en instabilitet.
- d. I fallet med byte av driftlägen beskriver komplementariteten ofta väl omkoppling av aktiva och inaktiva variabler och begränsningar. Det finns dock många olika tillvägagångssätt, och det är ännu inte klart vilket tillvägagångssätt som föredras från en beräkningseffektivitetssynpunkt.

Exempel på omkopplingsrelaterade instabiliteter är: SLL, bortfallsinducerad instabilitet, eller helt enkelt en omkoppling som sker som leder till en bifurkation.

Rekommendation

För att lösa dessa utmaningar har vissa möjliga framsteg identifierats:

- a. Den mest attraktiva vägen framåt för större system är förmodligen att skapa en gles beskrivning av de aktiva bivillkoren och system-Jakobianen. Detta behövs emellertid vissa djupare undersökningar och är starkt sammanflätade och sammanhängande med (c) nedan.
- b. Mängderna och motsvarande delmängder måste deklarerats och definieras så att ovanstående punkt säkerställs. Mängderna måste vara "överdimensionerade" i allmänhet, och då ska de aktiva delarna av dem vara lämpligt definierade inom modellen.
- Ett möjligt tillvägagångssätt här är studien av högre ordningars derivator. Hur ofta första ordningens partialderivator inte räcker behöver också undersökas ytterligare i studiefall.
- För enklare kraftsystemsmodellmodeller, utan generator eller lastdynamik, har speciella tillämpningsanpassade tillvägagångssätt [12] [13] föreslagits. Enklare modeller som de just nämnda kan användas av två huvudskäl: (1) beräkningsfördelar, och (2) brist på dynamisk kraftsystemdata för många system. Tillämpligheten och noggrannheten hos dessa tillvägagångssätt för dynamiska last- och generatormodeller behöver undersökas. Modelleringstillvägagångssätt som de som föreslås i [12] [13] måste jämföras med fler "klassiska" optimeringsmetoder som hanterar komplementaritet. Exempel på några möjliga och relevanta modelleringstillvägagångssätt är binärvariabler som används för att byte av driftläge, de "nyare" modelleringssätt med komplementaritetsbegränsningar som är fördelaktiga för många moderna lösare, eller "speciellt ordnade mängder av typ 1"-variabler (SOS1) [11] [10]. Dessa kan, åtminstone för mindre system jämföras för benchmarking, med det naiva "basfallet", där komplementaritet modelleras $a \cdot b = 0, a \geq 0, b \geq 0$ då a och b är komplementära.

3. Upptäckt

En utmaning med Edgeworth-serieutvidgningar är att de verkar vara mycket praktiska för att approximera CDF, men mindre så för väntevärden, varianser och andra stokastiska mått. Dessutom anges i litteraturen [14] att CDFer som innehåller stegfunktioner, behöver särskild behandling. Ett exempel på en funktion, vilken CDF skulle innehålla en stegfunktion är [1, Ekv. (214)].

Rekommendation

Några tillvägagångssätt som går runt detta hinder har föreslagits i [1, Avsnitt 4.2]. De metoder som föreslagits i [1, Avsnitt 4.2] måste utvärderas i praktiken. Många andra möjliga tillvägagångssätt liknande de föreslagna kan existera, och helt andra metoder kan hittas genom djupare studier i stokastisk approximationsteori.

4. Upptäckt

Från de andra ordningarnas ytapproximationer som erhöles för IEEE 9-buss-testsystemet, identifierades fall och punkter i lastrummet, för vilka ytapproximationerna var klart felaktiga. Dessa felaktigheter presenteras närmare i [1, Avsnitt 4.1.3]. De praktiska konsekvenserna av detta och möjliga sätt att få mer exakta ytrepresentationer, om det behövs, kvarstår att utvärdera.

Rekommendation

Först och främst måste det bestämmas om de identifierade fallen av ogiltiga delar av de approximerade ytorna är representativa för praktiska studiefall. Det behöver till exempel bestämmas hur mycket nettolasten kan förändras under en 15 minuters tidsperiod. Dessutom, även om delar av ytans approximationer är ogiltiga, måste effekten av detta på den optimala omfördelningslösningen utvärderas. I slutändan är de resulterande SOPF-lösningarna vad som är viktiga för detta projekt, inte precision för sin egen skull på varje detalj. För att kunna göra en sådan utvärdering måste emellertid en mer exakt ytrepresentation utvecklas. Mer exakta ytrepresentationer kan erhållas genom exempelvis högre ordningars polynom, styckvis sammansatta hyperplan (utan att införa för många heltalsvariabler) eller approximera varje yta runt mer än en punkt.

5. Upptäckt

För en TSO är det mer attraktivt att ha en konservativ ytrepresentation med lägre noggrannhet än en mer exakt som inte är konservativ. Med konservativ avses i denna rapport att ytan representeras av punkter antingen på den tillåtna sidan av den eller rätt på den, men aldrig på den otillåtna sidan av den. Sålunda är små medelfel på vilken som helst sida om ytan sämre än stora medelfel på rätt sida om ytan. Konservativare representation av ytornas kan uppnås genom att införa marginaler. Det har visat sig att marginaler kan introduceras på minst två olika sätt [1, Avsnitt 4.3]. Dessutom är det inte osannolikt att konservativa hyperytrepresentationer kan erhållas även på andra sätt. Frågorna är dock till vilken beräkningskostnad. I praktiken vill en TSO också använda någorlunda fräscha data i sin 15-minuters-energilansplanering [1, Avsnitt 2.7.5.3].

Rekommendation

Denna punkt är på ett tydligt sätt delvis sammankopplad med ovanstående punkt som behandlar olika sätt att representera de operativa

gränsvärdena. Som föreslagits i [1, Avsnitt 4.3] bör det finnas åtminstone två sätt att använda marginaler för att skapa approximationer av andra ordningens ytor som är mer konservativa än helt utan marginaler. För att utvärdera dessa två tillvägagångssätt behövs en jämförelse för några representativa numeriska studier där många punkter på de faktiska ytorna beräknas. Vidare har de inte undersökts, men det är rimligt att utgå från att approximationsmetoder existerar som kan kurvanpassa ytor konservativt. Huruvida sådana ytor kan hittas tillräckligt snabbt för en praktisk tillämpning behöver studeras ytterligare. Vidare behövs ytterligare undersökningar om huruvida ytrepresentationen skulle passa bra i en sannolikhetsvillkorad SOPF med hänsyn till beräkningsbelastningen.

6. Upptäckt

Under arbetets gång insågs det att dagens tillvägagångssätt för att hitta den viktigaste punkten där driftsgränsvärdena approximeras är huvudsakligen tillämplig för unimodala stokastiska fördelningar. Det är emellertid inte klart hur vanligt tydligt uttalade multimodala fördelningar är för okontrollerbara nettolaster i kraftsystem.

Rekommendation

Det behöver utvärderas, först, hur prediktioner av okontrollerbara nätbelastningar i kraftsystem kan se ut och hur ofta de representeras av multimodala fördelningar. Därefter behövs alternativa sätt för att approximerar ytorna (se föregående upptäckt), inklusive att helt enkelt hitta så många viktiga punkter som det finns lägen (moder) i fördelningen. Ett annat men något mer komplicerat tillvägagångssätt är att definiera den viktigaste punkten som väntevärdet i lastrummet inom planeringsperioden, givet att nettobelastningen kommer att ligga på ytan i fråga. Om antalet lägen (moder) går mot oändligheten, går fördelningen mot att vara likformig och då verkar den senare föreslagna metoden mindre attraktiv. Slutligen måste de nya sätten att approximerar ytorna jämföras med den metod som presenteras i [8] och [1, Avsnitt 2.3.1] för att validera om det är värt besväret att beakta och behandla multimodala fördelningar annorlunda än unimodala.

7. Upptäckt

Det noterades i [8] att distansfunktionsmetoden som användes och föreslagits där, och presenteras i mer detalj i [1, Avsnitt 2.4.2], inte är det faktiska euklidiska avståndet till approximationen av ytan. Effekterna av denna felaktighet är inte tydliga, det undersöks inte heller hur mycket mer komplicerat det skulle vara att beräkna och använda det faktiska euklidiska avståndet (eller andra avstånd som kan vara relevanta för studier av denna typ).

Rekommendation

Det första steget att utreda det här skulle vara att jämföra några representativa studiefall som approximerade avståndet till ytapproximationen med det faktiska avståndet till ytapproximationen, liksom med det faktiska avståndet till den faktiska ytan. Om den preliminära undersökningen indikerar en stor skillnad, måste en ytterligare undersökning göras för att ta fram ett mer exakt avståndsmått. Några preliminära undersökningar indikerar att en eventuell slutenformsrepresentation kan hittas eftersom ytapproximationen såväl som det euklidiska distansmättet är andra ordningens polynom.

8. Upptäckt

Det är i praktiken svårt att hitta både modeller och modellparametrar för de faktiska elkraftsystemen man önskar studera. Därför (och förmodligen är det svårt även att erhålla enklare modeller) är det vanligt att man i litteraturen endast studerar överföringsgränser (det vill säga g_y -delen av J). För mer generella instabilitetsstudier måste generator- och lastdynamiken beaktas. För att modellera alla delar av den automatiska regleringens (såsom primär- och sekundärreglering) konsekvenser för systemets jämvikt efter ett bortfall krävs mer detaljerade modeller än de som används i denna rapport.

Rekommendation

Uppgiftsinsamling behövs, liksom förbättrade modeller av systemen som studeras.

9. Upptäckt

Under arbetet har ett väsentligt hinder varit en mycket varierande terminologi beträffande notation och klassificering av instabiliteter samt av olika metoder som används för att hitta och lokalisera driftsgränser. Vissa ansträngningar har gjorts för att få en viss ordning i denna fråga i rapporten [1], även om flera saker fortfarande kunde ytterligare tydliggöras. Ibland komplicerar också notationen till saker mer än nödvändigt, speciellt för de differentialgeometriska beskrivningarna. I den bilagda huvudrapporten [1] är de matematiska beskrivningarna längre och detaljrikare än vad som är vanligt i det området. I huvudrapporten är beskrivningarna gjorda med hjälp av klassisk analys-notation, för att avdramatisera saker som kan verka obegripliga, men i verkligheten är ganska enkla.

Rekommendation

Fler (huvudsakligen litteratur-) studier behövs för att hitta sammanhängande, begripliga och logiska beskrivningar av många av de ämnen som behandlas i denna rapport och dess bilagda huvudrapport [1]. Olika klassificeringssystem måste översättas mellan och representeras gentemot varandra.

10. Upptäckt

Jämförelsevis sent i detta projekt "upptäcktes" förekomsten av SIB. När en SIB inträffar [15] är hela system-Jakobianen J icke-singulär, medan "nätdelen" g_y är singulär med ett nollegenvärde. Den dynamiska delen av Jakobianen har å andra sidan samtidigt ett egenvärde som passerar genom $\mp\infty$ samtidigt som ett egenvärde i g_y passerar genom ∓ 0 så att de "tar ut varandra" i system-Jakobianen. Huruvida den här typen av bifurkation är viktig för de nät som berörs av detta projekt är fortfarande inte klart, men de verkar vara av betydelse för stabiliteten i kraftsystemen [16] [17]. Om SIBer ska beaktas måste man förmodligen skapa en modell som identifierar en sådan yta genom att hitta singulariteten i g_y , samtidigt som SNB-möjligheten uteslutes genom att säkerställa att $\det(J) \in \mathbb{R} \setminus [0 - \varepsilon, 0 + \varepsilon]$, $\varepsilon > 0$. Det är inte önskvärt att arbeta med $\mp\infty$ i en datormodell i praktiken.

Rekommendation

Fler studier behövs i kombination med numeriska experimentella och jämförande studier. Det kan vara en numerisk utmaning att upptäcka SIB utan att uttryckligen arbeta numeriskt med tal nära oändligheten ($\mp\infty$), eftersom det skulle göra problemet extremt svårt att lösa.

11. Upptäckt

Ett problem som har identifierats men inte behandlats på grund av tidsbegränsningar, är utmaningen inom ramen detta projekt att finna ytrepresentationer av SLLer. Eftersom växlingar mellan driftlägen kan vara så väl "ofarliga" som orsaka spänningsinstabilitet, har SLL-ytan skarpa ändpunkter. Frågan behandlas i något utförligare i [1, Avsnitt 2.3.3.5].

Rekommendation

Ytterligare undersökningar (experimentella såväl som i litteratur) avseende SLL-representationen i faktiska lastrummet behövs för att ge klarhet i denna fråga. När den grundläggande förståelsen har uppnåtts, behövs utredas hur man hanterar ändpunkterna på dessa ytor när de ska representeras i ett framtida SOPF-problem som beaktar även dem.

3 Citerade verk

- [1] L. Abrahamsson, "Considering risks in power system operation and the consequences of different accepted risk levels," Skellefteå, 2017.
- [2] F. Hassan and M. H. Bollen, *Integration of Distributed Generation in the Power System*, Wiley-IEEE Press, 2011.
- [3] M. H. J. Bollen, *The Smart Grid: Adapting the Power System to New Challenges*, Morgan and Claypool Publishers, 2011.
- [4] M. Perninge och L. Söder, "Geometric properties of the loadability surface at SNB-SLL intersections and Tangential Intersection points," i *Intelligent System Application to Power Systems (ISAP)*, 2011 16th International Conference on, 2011.
- [5] C. Hamon, "On Frequency Control Schemes in Power Systems with Large Amounts of Wind Power," KTH, Stockholm, 2012.
- [6] C. Hamon, M. Perninge och L. Söder, "A computational framework for risk-based power systems operations under uncertainty. Part I: Theory," *Electric Power Systems Research*, 2015.
- [7] M. Perninge och L. Söder, "On the Validity of Local Approximations of the Power System Loadability Surface," *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 2143-2153, 2011.
- [8] M. Perninge, "Stochastic optimal power flow by multi-variate Edgeworth expansions," *Electric Power Systems Research*, pp. 90-100, 2014.
- [9] M. C. d. O. F. d. Trinidad, "Optimal Location of FACTS to optimize power system security," Instituto Superior Técnico, Lissabon, 2013.
- [10] R. E. Rosenthal, "GAMS -- A User's Guide," 2007.
- [11] B. A. McCarl, A. Meeraus, P. van der Eijk, M. Bussieck, S. Dirkse, P. Steacy och F. Nelissen, "McCarl GAMS User Guide, Version 23.8," GAMS Corporation, 2012.
- [12] W. Rosehart, C. Roman och A. Schellenberg, "Optimal power flow with complementarity constraints," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, nr 2, pp. 813-822, 2005.
- [13] C. Roman och W. Rosehart, "Complementarity model for generator buses in OPF-based maximum loading problems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, nr 1, pp. 514-516, 2005.
- [14] J. E. Kolassa och P. McCullagh, "Edgeworth Series for Lattice Distributions," *The Annals of Statistics*, vol. 18, nr 2, pp. 981-985, 1990.
- [15] T. V. Cutsem och C. D. Vournas, "Voltage stability analysis in transient and mid-term time scales," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, nr 1, pp. 146-154, 1996.
- [16] V. Venkatasubramanian, H. Schättler och J. Zaborszky, "A taxonomy theory of the dynamics of large power systems with emphasis on its voltage stability," i *Proc. NSF Int. Workshop on Bulk Power Syst. Voltage Phenomena-II*, 1991.
- [17] V. Venkatasubramanian, X. Jiang, H. Schättler och J. Zaborszky, "Current status of the taxonomy theory of large power systems dynamics --- DAE systems with hard limits," i *Proc. Bulk Power System Voltage Phenomena III --- Voltage Stability and Security*, 1994.

RISKER I DRIFT AV ELKRAFTSYSTEM OCH KONSEKVENSER AV OLIKA ACCEPTERADE RISKNIVÅER

Vissa driftsgränser är mindre allvarliga än andra och det finns därför behov av att ta hänsyn till olika risknivåer. Att överskrida överföringsgränsen för en elledning medför exempelvis ingen inverkan alls på systemets driftssäkerhet. Men att överskrida gränsen för spänningsstabilitet har däremot allvarliga och omedelbara konsekvenser.

Här visar resultaten att det finns möjligheter att minska kostnaderna för reglering i elnätet när man inte behöver ta lika mycket hänsyn till alla driftgränser.

På längre sikt innebär det bland annat att framtida elnät med större mängder förnyelsebar produktion kommer att kunna drivas säkert och med mindre behov av investeringar i nya ledningar. För samhället innebär det mindre bundet kapital i elnätet och en billigare drift, vilket gör att offentliga och privata medel kan användas på annat sätt. Att möjliggöra en större mängd förnyelsebar produktion är självklart också bra för miljön.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk