

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Drift av stora kraftsystem med små mängder av fysiskt tröghetsmoment	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Operation of large power systems with small amounts of physical inertia	
Universitet/högskola/företag LTU	Avdelning/institution Energivetenskap/ Institutionen för teknikvetenskap och matematik
Adress Elkraftteknik Energivetenskap Institutionen för teknikvetenskap och matematik Luleå tekniska universitet 931 87 Skellefteå	
Namn på projektledare Math Bollen	
Namn på ev övriga projektdeltagare Martin Lundmark (har varit bihandledare), och Lars Abrahamsson (nuvarande bihandledare)	
Nyckelord: 5-7 st Elkraftsystem, banmatning, omriktare, stabilitet, omformare, järnväg, elsystem	

Förord

Projektet finansierades till 40% av Energimyndigheten och till 60% av Trafikverket.

I referensgruppen satt ursprungligen Mats Häger (referensgruppens ordförande, Trafikverket), Katherine Elkington (Svenska Kraftnät), och Magnus Olofsson (Elforsk AB, sedermera Energiforsk AB). Katherine lämnade gruppen då Svenska Kraftnät tappade intresset av projektet i ett tidigt stadium.

Innehållsförteckning

Bakgrund järnvägselnät	3
Transient stabilitet och tröghet i frekvensomvandlingen.....	4
Utmaning och frågeställning i projektet	5
Kunskapsläget	5
Angrepp, syfte, hypoteser	6
Huvudman, finansiering, tid som projektet pågått.....	6
Tolkning av resultaten	9
Resultaten i ett energisammanhang	9
Vad behöver göras härnäst.....	9
Effekter i samhället	11

Sammanfattning

Projektet har hanterat upplevd problematik gällande instabilitet i järnvägselnätet (även kallat banmatningsnätet). I takt med att järnvägselnätet i Sverige byggts ut med ökad andel statiska omriktare har den fysiska trögheten i systemet minskat. Allmänt har nätet även ändrat karaktär gällande framförallt transienta förlopp.

Ett antal händelser i såväl södra Sverige som händelser relaterade till det högspända överföringssystemet som sträcker sig mellan Svealand och Övre Norrland motiverade projektet.

Om kraftförsörjningen till järnvägen drabbas av instabilitet och i värsta fall längre avbrott påverkas givetvis trafiken. Detta kan påverka villigheten att använda järnvägen som är energieffektiv och kan förses med elkraft producerad från förnyelsebara energikällor.

Inom projektet har litteratur och mätdata studerats. Modeller har utvecklats och anpassats för den mjukvaran som använts. Mjukvara har valts utifrån vad som bäst passar de önskade modellerna.

Simuleringar har gjorts med två huvudsakliga syften. Det ena är att genom jämförelser med mätdata verifiera att modellerna och mjukvaran ger realistiska beskrivningar av järnvägselnätet vid transienter. Det andra är att variera problemuppställningar, nätkonfigurationer och händelser för att bygga upp en djupare och bredare förståelse om hur systemet allmänt beter sig.

Projektet har utökat förståelsen om systemets uppbyggnad och krav på modellering för att genom simuleringar återskapa de upplevda problemen. Detta har gjorts för att senare kunna komma på sätt att undvika dessa problem. Via modelluppbyggnad och simuleringar har framförallt nya insikter gjorts gällande interaktionen mellan statiska omriktare och roterande omformare för olika elektriska avstånd emellan i järnvägselnätet under transienter.

Summary

The project has treated the experienced problems of the current instability in the railway power grid (also called the electrified traction grid). As the railway electricity network in Sweden has been expanded with an increased proportion of static converters has the proportion of physical inertia of the system been reduced. Generally, the network has been changed in terms of its characteristics particularly in regards of transients.

A number of events in both southern Sweden and events related to the high-voltage transmission system extending between Svealand and Upper Norrland motivated project.

If the power supply to the railways suffer from instability and, at worst, longer interruptions it will naturally affect the traffic. This may affect the willingness to use the railway, which is an energy efficient mean of transportation that can be supplied with electricity produced from renewable energy sources.

The project has studied literature and data. Models have been developed and adapted to the software used. Software was selected based on what best suits the desired models.

Simulations have been made with two main purposes. One is that, by comparison with the measured data, to verify that the models and the software provides realistic descriptions of the railway power grid during transients. The second is to vary problem setups, network configurations and events to build a deeper and broader understanding of how the system generally behaves.

The project has increased the understanding of the system structure and the demands on modeling for the simulations to reproduce the experienced problems. This has been done in order to later find ways to avoid these problems. Through model-development and simulations, particularly new insights have been gained regarding the interactions between the static and the rotary converters for various electrical distances between them in the railway power grid during transients.

Inledning/Bakgrund

Bakgrund järnvägselnät

Järnvägselnät som matas av omriktare och/eller omformare från det allmänna elnätet, och/eller från produktion i egen regi kan på ett sätt beskrivas som extremt stora mikronät. Det handlar i dagsläget främst om likströmsnät i ett större antal länder, det Svensk-norska sammankopplade järnvägselnätet, det Centraleuropeiska (Tyskland-Österrike-Schweiz) sammankopplade järnvägselnätet, samt den så kallade ”nordöstra korridoren” i USA som spänner över ett antal delstater i nordost. Fokus i studierna i detta projekt är ställt mot det Svensk-norska systemet, vilket har mycket gemensamt i teknikval och drift med den nordöstra korridoren (samt vissa återstående delar av de östtyska riksbanorna som ännu inte konverterats), och gällande teknikval och nätkodex med det Centraleuropeiska järnvägselnätet. Likströmsbanor har i många avseenden en annan karaktäristik i dagsläget och berörs inte så mycket av detta projekts studier. Däremot kan vissa lärdomar dras för och likheter finnas med enfasiga och geografiskt stora AC mikronät.

Järnvägselnät skiljer sig från det allmänna elnätet såtillvida att laster och viss tillfällig produktion (tågen) rör på sig i nätet. Många modeller av tåg som bromsar kan återmata effekt till nätet och blir då kortvarigt produktionsenheter i stället för laster.

Denna typ av nät måste administreras och drivas av infrastrukturägaren, i Sverige Trafikverket. Järnvägselnätet är enfasigt av praktiska skäl, det är otympligt med tre luftledningarna och en strömavtagare på ett fordon, helst om spåret kröker. De idag större existerande omformar-/och omriktarmatade järnvägselnäten är i lågfrekvent växelström – 16 2/3 Hz (S, N), 16.7 Hz (D, A, CH), och 25 Hz (USA). Härmed refereras om inget annat sägs till dessa typer av nät när ordet ”järnvägselnät” nämns.

Transient stabilitet och tröghet i frekvensomvandlingen

Transienter är enligt svenska Wikipedia ett svängningsförlopp av kort varaktighet. Som exempel på transienter nämns de kortlivade strömmar som uppkommer i en elektrisk krets när brytare öppnas eller sluts. När transienter inte är kortlivade – men heller inte växande brukar de bli till oscillationer. När de är växande blir de också kortlivade, men mera för att systemet slutar att fungera. Transienta tidskonstanter är sällan längre än 10 sekunder. Subtransienta tidskonstanter är sällan längre än 0,1 sekunder. Transienta stabilitetsproblem handlar alltså om förlopp som sker på någon enstaka sekund och är relativt kraftiga i sin tidsderivata. Andra stabilitetsproblem kan smyga sig på mera långsamt och behöver inte triggas av en specifik händelse eller störning.

Historiskt har järnvägselnät försetts med elkraft från antingen egen produktion i enfasig växelström i termiska kraftverk eller vattenkraftverk, eller från det allmänna elnätet via roterande omformare. Med dessa typer av försörjning av elkraft har elnätets förmåga att klara stora och snabba (transienta) störningar varit relativt god, eftersom dessa tekniker innefattar stora mängder fysisk roterande masströghet.

Under de senare decennierna har inga nyinvesteringar i roterande omformare gjorts, utan all extra kapacitet för frekvensomvandling mellan det allmänna 50 Hz-nätet och 16 2/3 Hz järnvägselnätet har varit i form av statiska omriktare av olika typer. I Sverige utgörs idag ungefär 60 % av omvandlingskapaciteten av statiska omriktare.

Gemensamt för alla statiska omriktare är att de består av kraftelektronik. Den lagrade fysiska energin i en omriktare är oavsett teknisk lösning betydligt mindre än den i en roterande maskin. I omriktare med likströms mellanled kan en stor kondensator i mellanledet erbjuda en viss mängd energi, men det är inte ekonomiskt försvarbart med energier motsvarande rörelseenergin i en roterande omformare. I det Svensk-norska systemet är ännu så länge överföringsförmågan relativt begränsad, och den egna kraftproduktionen är i dagsläget begränsat till två små vattenkraftverk i södra Norge. Alltså har alla järnvägselnät fått minskad andel fysisk tröghet, och det är mest uttalat i Skandinavien.

Under senare år har antalet stabilitetsproblem ökat. Problemen har varit mer uttalade i delar av järnvägselnätet med stor andel statiska omriktare. Det är detta som är bakgrunden till detta projekt – att skapa djupare förståelse bakom dessa fenomen, för att i förlängningen kunna undvika eller minimera fenomenen.

Det bör nämnas att statiska omriktare har många fördelar. De är snabbare i respons på en lastförändring, de är styrbarare, och de har lägre energiförluster än roterande omformare. Dock töms de snabbt på energi, och de kan därför inte överlastas relativt märkström på samma sätt som en roterande maskin kan. Dessutom säkerställer strömbegränsningslägena som beskrivs nedan att omriktare inte riskerar att skadligt överlastas i någon större utsträckning. I sin tur innebär det att de inte behöver kopplas bort för att skyddas i händelser av långvarigt hög last. En roterande omformare som kopplas bort för att den är termiskt överlastad

kommer i sin tur att utsätta ett redan ansträngt system för ytterligare en transient och ännu större effektbrist, som snabbt leder till ett strömavbrott.

Vissa, men inte alla, av problemen har verkat relaterade till omriktare som byter driftlägen – dvs går in i eller ut ur strömbegränsningslägen.

Strömbegränsningslägena är relaterade till märkströmmen för en omriktare. För omriktare som inte klarar av eller är programmerade att inte tillåta återmatning av effekt till det allmänna elnätet finns även ett strömbegränsningsläge för detta. När en omriktare byter driftläge kan alltså en liten ändring i nettolast för omriktaren leda till kraftiga förändringar i systemets beteende.

Övriga transienter som kan leda till instabilitet är ovanligt stora förändringar i nettolast; fel i ledningar, transformatorer, eller andra komponenter; bortkopplingar av fel; samt inkoppling av tidigare bortkopplingar.

Med stor fysisk tröghet och mycket fysisk lagrad energi har nätet en större förmåga att hantera transienter utan att spänningarnas belopp och vinklar påverkas så mycket att nätets drift äventyras. Det skandinaviska järnvägselnätet drivs synkront med det allmänna elnätet, så frekvensinstabilitet förekommer inte så länge det allmänna elnätet är stabilt.

Längs stambanorna norr om Häggvik har ett antal felfall inträffat där kombinationen av statiska omriktare som inte klarar aktiv effektåtermatning, kraftigt bromsande återmatande tåg, och ett starkt järnvägselnät kan antas vara bidragande orsaker till stabilitetsproblemen.

Utmaning och frågeställning i projektet

En huvudutmaning är först och främst att modellera järnvägselnätet tillräckligt detaljerat för att kunna återskapa vissa av de stabilitetsproblem som uppkommit under senare tid. Därefter gäller att undersöka alternativ styrning – framförallt för de statiska omriktarna – men även i viss utsträckning för de roterande omformarna – för att förbättra systemets transienta stabilitet. Styrningen i sig kan troligen behöva anpassas lokalt efter varierande nätstyrka, avstånd till angränsande omformarstationer, och omformarstationernas styrkor och konfigurationer.

Nyttan med projektet är, förutom ökade kunskaper om järnvägselnätets respons för olika konfigurationer och transienter, på längre sikt, ett stabilare järnvägselnät. Om en instabilitet leder till strömavbrott (bortkoppling för att skydda utrustning) eller ett kraftigt spänningsfall påverkas tågtrafiken. För att klara miljö- och klimatmål behövs en ökad andel spårtrafik. Detta gäller såväl persontrafik som godstransporter. En förutsättning för detta är att spårtrafiken är tillförlitlig och att järnvägselnätet klarar dagens och framtidens ökade krav.

Kunskapsläget

Transient stabilitet har för allmänna trefaselnät i 50 Hz eller 60 Hz studerats relativt omfattande och över lång tid. För lågfrekventa enfaselnät har däremot transient stabilitet inte studerats i någon större utsträckning. Desto mindre så för järnvägselnät.

För det centraleuropeiska systemet har något fler studier gjorts än för de skandinaviska och nordostamerikanska [1] [2]. Dock är det centraleuropeiska sedan några decennier tillbaka asynkront det allmänna nätet, har typiskt stor andel egen kraftproduktion, och är elektriskt mycket starkare sammanlänkat. Därför är flertalet av dessa studier inte applicerbara för skandinaviska eller nordostamerikanska förhållanden.

För Skandinavien har en handfull studier gjorts för bland annat interaktioner mellan omformare och lok/motorvagnar [3] [4] [5] [6]. 1989 gjordes ett examensarbete på KTH [7] gällande transient stabilitet i järnvägsnätet i dess helhet.

För en mer detaljerad genomgång av litteraturen, se framförallt kapitel 4 i [8].

Angrepp, syfte, hypoteser

En förenklad modell för statiska omriktare har tagits fram. Den skall spegla en allmän statisk omriktare och i detta läge inte en speciell teknik, eller speciell modell. Den statiska omriktarmodellen består av en enfasig generator med anpassade värden för tröghet och dämpning. Dock skiljer sig modellen från en enfasgenerator från det att den beaktar omriktarens strömbegränsningsläge(n).

Relativt enkla men klassiska modeller av roterande omformare har även använts.

Dessa modeller har använts i nätkonfigurationer och lastsituationer som är representativa för Sverige för att studera transient stabilitet.

Hypoteser har varit att det kan finnas en bra blandning av roterande omformare och statiska omformare ur ett stabilitetsperspektiv. En annan hypotes har varit att man med enkla modeller av generaliserade statiska omriktare kan skapa en grundläggande förståelse för problematiken och förklara en ansenlig andel av de fenomen som uppstår. Vidare har antagits att i de delar av järnvägsnätet som andelen statiska omriktare är mycket stor kan styrningen av omriktarna vara avgörande för förbättrad stabilitet.

Huvudman, finansiering, tid som projektet pågått

Huvudman är Luleå Tekniska Universitet, finansieringen för detta projekt erhålls från Energimyndigheten och Trafikverket (via Energiforsks Elektraprogram). Projektet har formellt sett sträckt sig från 2014-07-01 till och med 2016-12-31. Licentiatavhandlingen presenterades 17 juni 2016. Arbetet vidare mot doktor har fortsatt enligt plan därefter.

Anställning av doktoranden startade tidigare och kommer att fortsätta även efter projektet slutade. Finansiering innan uppstarten av det Energiforsksfinansierade projektet erhöles från Skellefteå Kraft samt från gruppens egna fakultetsmedel. Det söks för närvarande medel för fortsatt finansiering av doktoranden; under tiden används gruppens egna fakultetsmedel även här.

Genomförande

Projektet genomfördes som ett doktorandprojekt inom forskningsämnet Elkraftteknik på Luleå tekniska universitet. Doktoranden var John Laury. Huvudhandledaren var Math Bollen; bihandledare var Martin Lundmark och Lars Abrahamsson (först under sin anställning på KTH och senare under sin anställning på Luleå tekniska universitet).

Projektet inleddes med informationsinhämtning genom litteraturstudier och diskussioner med sakkunniga inom Trafikverket, Jernbaneverket och akademien.

Därefter har modeller utvecklats och eller anpassats för de planerade studierna.

Förutom teoretisk utveckling av och förenkling av modeller har anpassning av dessa för implementering i lämplig mjukvara genomförts. Ett flertal alternativa mjukvaror har testats och utvärderats för att jämföra deras möjligheter för implementering av de egenutvecklade modellerna. Jämförelser har även gjorts gällande mjukvarornas förmåga att återskapa realistiska resultat. Slutligen valdes Matlab som det mest lämpliga.

Inom projektet fördes även en diskussion om alternativa framtida nätdesigner för järnvägsnät, innefattande t.ex. högspänd likström i matarkablar som alternativ till dagens högspända transmissionsnät som stärker upp överföringsförmågan i delar av järnvägsnäten.

Dynamiska simuleringar i Matlab har genomförts där järnvägsnätet utsatts för transienta störningar. Olika driftsfall och systemkonfigurationer som är realistiska för Sverige har studerats.

Resultat

Bidrag i punktform:

- En förenklad modell av en statisk omriktare har utvecklats. Denna möjliggör transienta beräkningar. Den inkluderar även strömbegränsningar.
- Stabilitetsberäkningar har gjorts för fel i olika typer av testsystem. Studierna har bekräftat att i system med uteslutande roterande omformare och realistiska tider för felutlösningar är järnvägsnäten transient stabila.
- Det har visats att för omformarstationer innehållande blandade populationer av roterande omformare och statiska omriktare uppkommer inbördes svängningar mellan de statiska och roterande enheterna. Frekvensen på dessa stationsinterna svängningar har visats ligga i spannet från omkring 1,1 Hz till 1,25 Hz [8]. Strömoscillationerna mellan enheterna i en station sker i såväl magnitud som fas.
- Optimal styrning av omriktare i ett VSC-HVDC-matat järnvägsnät har visat sig kunna leda till förlustreduktioner på upp till 90% beroende på typ av kontaktledningssystem.

- En översyn har gjorts gällande driften av järnvägselnät med lågfrekvent växelström drivna synkront med det allmänna elnätet, samt dess olika typer av använda och möjliga framtida infrastrukturer. En översyn av de specifika skillnaderna mellan de skandinaviska och de centraleuropeiska järnvägselneten med lågfrekvent växelström har även gjorts.

Resultaten från simuleringarna visar att efter en störning kan effektpendlingar mellan omformare och omriktare i samma omformarstation uppkomma. Effektpendlingar mellan omformarstationer efter en störning minskar då andelen statiska omriktare ökar.

Vidare har visats att i system med enbart roterande omformare blir oscillationerna mellan stationerna omkring 0,5 Hz [8].

I analys av mätdata har även noterats effektpendlingar mellan statiska omriktare av olika modeller i samma station. Detta har ännu inte förklarats teoretiskt utan är en fråga för framtida studier.

Ett oväntat resultat var att när ett fel inträffar på lika elektriskt avstånd mellan två omformarstationer bestående av enbart roterande omformare förekom inga vinkeloscillationer. En preliminär förklaring till detta är att impedansen som omformarna ser är densamma. Därför agerar omformarna i respektive station identiskt, det vill säga som om de satt i samma station.

Diskussion

Först bör nämnas att kraftsystemdynamik i sig är ett komplicerat område. För enfasiga elsystem som matas med en blandning av roterande omformare och statiska omriktare, där lasterna som är i samma storleksordning som kraftförsörjningen dessutom rör sig spatialt i systemet samt varierar kraftigt i tid mellan negativa och positiva värden blir utmaningen inte mindre. Eftersom området banmatningsstabilitet ännu är relativt outforskat krävs grundläggande förståelse innan förenklade modeller kan tas fram för att studera interaktionen i systemet i stort.

En annan utmaning i fråga om banmatning gäller detektering och klassificering av fel, då lasterna är så stora i relation till kraftförsörjningen. Dessutom ökar variationen av typer av laster. Om loken/motorvagnarna skall utnyttjas i framtidens smarta elnät med aktivare styrning av aktiv och reaktiv effekt kommer troligen detektering av en ”typisk” tåglast kompliceras ytterligare. Ovanstående problematik kan inte väntas minska i framtiden med snabbare, tyngre, och kraftfullare tåg med tätare avgångar.

När ett fel inträffat på ett stort elektriskt avstånd från en omformarstation kan det vidare vara svårt att särskilja ett fel från en stor tåglast. Detta då resistansen i framförallt sugtransformatorkontaktledning är relativt hög, och reaktiva lasten i vissa typer av lok kan vara förhållandevis hög.

Det bör även nämnas att jämfört med allmänna elnät är störningar i spänningar och strömmar betydligt större och mer accepterade i järnvägselnät. Detta i sig utgör utmaningar för en stabil drift.

Tolkning av resultaten

Resultaten som hittills har kommit fram i studien visar att vissa grundläggande karaktäristika för stabilitet i järnvägselnät kan återskapas och förstås. Mera detaljerade modeller förväntas nödvändiga för att återskapa och djupare förstå vissa av de ännu oförklarade fenomenen. Exempel på sådana är när statiska omriktare av olika modeller svänger mot varandra och beter sig olika. Ett annat exempel som förekommer är att omriktare av samma modell och typ i samma station kan bete sig olika.

Hitintills har lasterna (tågen) modellerats så enkelt som möjligt, som konstanta impedanser under det transienta förloppet under och efter att ett fel inträffat. Att modellera tågen i en komplexitetsnivå liknande den för de statiska omriktarna skulle ge ytterligare förståelse för vissa av de ännu inte adresserade fenomen som uppstår i systemet.

Resultaten i ett energisammanhang

Först och främst är resultaten användbara för det långsiktiga syftet att bygga ett driftssäkrare och stabilare transportsystem. Med ökad mängd transporter på järnväg, och i framtiden elvägar kommer denna typ av utmaningar att öka. Detta gäller alltså på lång sikt inte bara järnvägar, och inte bara i Sverige.

I sammanhanget bör nämnas att i länder med järnvägar i samma systemfrekvens som det allmänna elnätet (50 Hz eller 60 Hz) ökar lasterna och järnvägar elektrifieras numera också i områden där det matande allmänna elnätet är svagt. Därför har intresset för omriktarmatning av järnväg ökat generellt på det internationella planet under senare tid [9] [10] [11] [12].

För att elsystemet inte skall begränsa en hållbar omställning av transportsystemet i Sverige och Världen är denna typ av studier viktiga. Större, kraftigare, och snabbare tåg kommer dessutom leda till ännu kraftigare variationer i lasternas värden, tecken, och positioner. Utbyggda järnvägselnät med ökad överföringsförmåga kan leda till minskad dämpning i ledningarna.

I ett vidare perspektiv är mikronät i ropet. Järnvägen var, som i så många andra sammanhang, före sin tid utan att veta om det. Järnvägselnät är transnationella mikronät av väldigt speciell karaktär. Därför kan erfarenheter från elektrifierade transportsystem troligen överföras för kunskapsutveckling av mikronät – och omvänt.

Vad behöver göras härnäst

I punktform

- Mer detaljerade tågmodeller behövs. Det gäller olika typer av tåg och olika typer av styrning och även äldre modeller av tåg och styrning.

- Gå in i större detalj på vad som sker inne i en statisk omriktare, av olika modeller, under en transient.
- Mera detaljerade modeller behövs för studier i tidsdomän där även övertoner och likströmskomponenter implicit eller explicit hanteras.
 - Många lok skapar kraftiga övertoner
 - Is på kontaktledningen kan skapa likströmskomponenter
 - Mätningar har visat att strömmarna i järnvägselnätet (och även strömmar inom omformarstationerna) är kraftigt icke-sinusformade. Ibland är andra frekvenskomponenter än grundtonen faktiskt större än grundtonen.
 - De höga övertonsnivåerna kan sannolikt resultera i att övertonsinstabilitet kan uppstå mellan olika omriktare.
 - Om inte denna hänsyn tas kan omriktarströmmarna underskattas och hanteringen av strömbegränsningslägena bli ytterligare komplicerade. Komponenters värmeutveckling bryr sig inte om strömmens eventuella frekvens, utan främst dess styrka. Dock kan styrsystemen och även strömbegränsningen fokusera på grundton eller ett visst frekvensband.
- Ta hänsyn till olika omriktares olika hantering av strömbegränsningen. Inställningar och styrsystem såväl som deras fysiska design. Konkret bör adresseras:
 - Kriterier för att gå in i strömbegränsningsläget
 - Kriterier för att lämna strömbegränsningsläget
 - Styrningen av aktiv respektive reaktiv effekt när omriktaren befinner sig i ett strömbegränsningsläge
 - Strömbegränsningsläge som förhindrar aktiv effektåtermatning, då strömmen genom omriktaren är lägre än märkström
- Alternativ styrning av spänningen på järnvägssidan i roterande omformare.
- Hur allt detta påverkar eller påverkas av regelverk, standarder och nätkodex.
- Utveckling av högre ordningens omformarmodeller
- Omformarmodeller där motor och generator modelleras separat och sammanlänkat
- En större systemstudie över det svenska järnvägselnätet där interaktionen mellan en större mängd omriktare i ett flertal omformarstationer beaktas. Här är järnvägssträckan mellan Häggvik/Hallsberg och Boden av stort intresse då elnätet är relativt starkt med en 132 kV överföringsledning och

bortsett från Häggvik består kraftförsörjningen nästan uteslutande av statiska omriktare.

- Mätningar
 - Ytterligare mätningar i omformarstationer. Vissa indikationer på ojämn sampling i existerande tillgängliga mätdata bör utredas ytterligare.
 - Mätningar av strömmar och spänningar vid fordonen. Gärna i kombination med fordonens positioner och hastigheter.
 - Analyser av befintlig och ny mätdata

Effekter i samhället

På längre sikt kommer en ökad förståelse om järnvägselnätets stabilitet leda till modifierade och förbättrade nätkodex och kravspecifikationer på inköpt infrastruktur. För den befintliga infrastrukturen kan lämpliga uppgraderingar eller modifieringar i styrsystem göras.

När en stabilare drift av järnvägselnätet uppnås får man en attraktivare och tillförlitligare kraftförsörjning som möjliggör tyngre, tätare, och snabbare transporter drivna av kraftfullare motorer.

Förutom järnväg kan erfarenheterna appliceras på elvägar och till viss del på (vanliga) mikronät.

Publikationslista

Lista av publiceringar i punktform:

- Conference Paper: Multi-machine transient stability for railways. Computers in Railways XIV. October 2014. Rome.
- Conference Paper: Some benefits of HVDC supply solution for railways. NORDAC 2014. Stockholm.
- Conference Paper: Transient stability analysis of low frequency railway grids, COMPRAIL 2016, July 2016, Madrid.
- Submitted to a journal: Transient stability in low frequency AC traction grids with mixed electronic and rotational generation, 2016
- Submitted to a magazine: Stability of 16 2/3 Hz railway traction grid, 2016. (Now changed to The Electricity Journal where it is under consideration for publication, 2017)

Referenser, källor

- [1] D. Slepicka and A. Mariscotti, "Analysis of frequency stability of 16.7 Hz railways," in *2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2011.
- [2] A. Zynovchenko, H.-J. Haubrich and P. Treige, "Converter control and stability of the 110-kV railway grid increasing use of the static frequency converters," in *2005 European Conference on Power Electronics and Applications*, 2005.
- [3] H. Y. Assefa, "Stability Investigation of an Advanced Electrical Rail Vehicle," MA thesis. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2009.
- [4] S. Danielsen, "Electric Traction Power System Stability," PhD thesis. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2010.
- [5] T. V. D. Lindern, "Dynamic Control of Static Converters," MA thesis. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2012.
- [6] S. Danielsen, O. B. Fosso and T. Toftevaag, "Use of participation factors and parameter sensitivities in study and improvement of low-frequency stability between electrical rail vehicle and power supply," [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/articleDetails.jsp?arnumber=5279188>. [Accessed 17 June 2016].
- [7] M. Olofsson, "Undersökning av transient stabilitet i matningssystem för elektrisk tågdrift," Master Thesis. Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, 1989.
- [8] J. Laury, "Transient Stability in Low Frequency Railways with Mixed Electronic and Rotational Generation," Licentiate Thesis, LTU, Skellefteå, 2016.
- [9] ABB, "Static frequency converter supports 50 Hz rail network. Advanced power conversion keeps Queensland Rail's network on track," 2016. [Online]. Available: https://library.e.abb.com/public/88d6274dd1244a7289b0aca0202de98f/ABB_Reference_Wulkuraka_EN_web.pdf. [Accessed 20 January 2017].
- [10] L. Abrahamsson, "Optimal Railroad Power Supply System Operation and Design," KTH, Stockholm, 2012.
- [11] D. Sharifi, P. Tricoli and S. Hillmansen, "A new control technique enabling dual-feeding of 50 Hz AC railways with static converter feeder stations," in *8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016)*, Glasgow, 2016.
- [12] I. Perin and G. R. Walker, "Protection of a Static Frequency Converter fed traction network, a case study," in *2015 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Wollongong, 2015.
- [13] L. Abrahamsson, "Administrativ bilaga till slutrapport," Energimyndigheten/LTU, Stockholm/Skellefteå, 2017.

Bilagor

- Administrativ bilaga [13].
- Licentiatavhandling med tillhörande publikationer [8].