

OPTIMAL DRIFT OCH DIMENSIONERING AV BANMATNINGSSYSTEM

RAPPORT 2016:273



Optimal drift och dimensionering av banmatningssystem

Slutrapport Elektraprojekt

LARS ABRAHAMSSON

ISBN 978-91-7673-273-1 | © 2015 ENERGIFORSK

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

Förord

Detta projekt har bedrivits inom forskningsprogrammet Elektra. Elektras vision är att högskolan i samverkan med industrin ska formulera och lösa forskningsuppgifter som svarar mot industrins problemställningar och som samtidigt leder till utbildning av forskarstuderande samt seniorforskning vid högskola och universitet. Elektra är ett samverkansprogram och finansieras gemensamt av Energimyndigheten och ett antal näringslivsaktörer.

Det här projektet bidrar med viktig ny kunskap angående hur några av framtidens utmaningar kring kraftförsörjning av järnväg kan hanteras.

Ansvarig projektledare har varit Lars Abrahamsson (tidigare KTH, numera LTU) och i projektets referensgrupp har representanter från Trafikverket medverkat.

Stockholm 2016-04-04

Sammanfattning

Rapporten beskriver bakgrunden till postdoktorsprojektet, samt beskriver syftet till verksamhetsuppdraget. Ekonomi, huvudmän bakom projektet, utförare, externa intressenter, industrikontakter, samt referensgruppens sammanställning finns också redogjort.

Under det stora avsnittet, "huvudresultat" behandlas de konkret framtagna resultaten och uppkomna erfarenheterna inom ramen för projektet. Där diskuteras även måluppfyllelse och effekter i samhället.

Resultaten handlar kortfattat om:

- Optimal placering av energilagringssystem i tunnelbanenät. I själva studien är syftet huvudsakligen att använda energilagringen för att bättre kunna utnyttja bromsenergi. Modellen är dock generell och kan exempelvis även användas för att jämma ut lasttoppar över tid och mellan likriktarstationer.
- Lastdelning mellan omformarstationer medelst aktivering/avaktivering av roterande omformare och spänningsstyrning. Detta handlar helt enkelt om att få till stånd en energieffektivare drift av banmatningssystemet, även de inte lika enkelt styrbara delarna av det.
- Optimal reaktiv effektstyrning på lok. Resultaten visar att man för svaga nät kan underlätta tågföring och återmatning, samt att man generellt sett får en energieffektivare drift. En positiv bieffekt av detta är att banmatningen blir okänsligare för bortfall av omformarkapacitet.
- En modell har utvecklats för framtida möjlighetsanalys med avseende på banmatningssystemets begränsningar av optimala tågföringsplaner beräknade utan hänsyn till elkraftsystemet.
- En modell för adaptiv tomgångsspänning på likriktarstationer i ett tunnelbanenät har utvecklats. Resultaten går dock (om än inte utan handpåläggning) att generalisera till växelströmsmatade banor.
- En modell för utvärdering av banmatningens tillförlitlighet med avseende på omriktar-/omformarmatning har utvecklats. Modellen visar att ett enkelt och gott mått på tågens effektbehov är att räkna antalet tåg per banmatningssektion. Målsättningen här är att kartlägga områden eller specifika omformarstationer som behöver förstärkas effektmässigt med avseende på tillförlitligheten.

De övergripande målen utifrån definitionerna "första området" och "andra området", samt de tre viktiga övergripande uppgifterna listade i Avsnitt 2.2.1

har funnits uppfyllda. Detaljer i genomförandet har givetvis anpassats utifrån de förutsättningar som getts projektet och utföraren.

Samhällseffekterna har huvudsakligen handlat om informations- och kunskapsspridning, samt nätverksbyggande. Projektets tekniska genomförande beskrivs kortfattat separat. Övriga delar av genomförandet behandlas implicit i övriga delar av rapporten.

Summary

The report describes the background of the postdoctoral project, and describes the purpose of the task. Economy, principals behind the project, performers, external stakeholders, industry contacts, and the reference group's compilation are also stated.

In the large section, "the main results" the concrete produced results and experiences arising from the project are treated. The report also treats the effectiveness and impact in society.

The results are briefly about:

- Optimal placement of energy storage in the underground network. In the study, the aim is mainly to use the energy storage in order to better exploit the braking energy. The model is general and can for example also be used to even out the load peaks over time and between rectifier stations.
- Load sharing between substations by activating/deactivating the rotary converters and by voltage droop control (also called voltage compounding). This is simply about getting an energy efficient operation of the traction system, also the less controllable parts of it.
- Optimal reactive power control of locomotives. The results show that for weak networks reactive power control can facilitate train motoring and regeneration, and thus lead to a more energy efficient operation. A positive side effect of this is that the traction system becomes less sensitive to outages of converter capacity.
- A model has been developed for future feasibility analysis for power supply system limitations on optimal train operation plans calculated without regard to the electric power system.
- A model for adaptive no-load voltage of the rectifier stations in a subway DC power system has been developed. The results can, also (though not without laying on of hands) generalize to AC fed railways.
- A model for evaluating the traction system's reliability with respect to the converter feeding has been developed. The model shows that a simple and good-enough measure of train power needs is to count the number of trains per traction feeding section. The goal here is to identify areas or specific substations that need to be strengthened in terms of power capacity with respect to reliability.

The overall objectives following the definitions "first area" and "second area", and the three important overall tasks have been fulfilled. Details of

implementation have by natural reasons been adapted with respect to the conditions of the project and the performer.

Social effects have been mainly focused on information and knowledge, as well as networking. The project's technical implementation is briefly described separately. Other parts of the implementation are treated implicitly in other parts of the report.

Innehåll

1	Inledning	11
1.1	Bakgrund	11
1.2	Syfte till verksamhetsuppdrag	11
1.3	Problembakgrund	12
1.4	Huvudman & Finansiering	12
2	Huvudresultat	14
2.1	Resultat och erfarenheter	14
2.1.1	Optimal placering av energilagringssystem i banmatningsnät	14
2.1.2	Optimal tomgångsspänning för givna varierande tågtätheter	14
2.1.3	Lastdelning och optimal spänningsstyrning för omformarstationer med roterande omformare	15
2.1.4	Elkraftsystemsplugin till mekaniska tågsimulatorer	16
2.1.5	Optimal styrning av reaktiva effekter i asynkronloken i banmatningssystemet	17
2.1.6	Tillförlitlighetsanalys av banmatnings-omriktare/-omformare	17
2.2	Målpåfyllelse	18
2.2.1	Målen enligt dokument från Energimyndigheten (Dnr: 2013-004247)	18
2.2.2	Målen uppfyllelse	19
2.3	Effekter i Samhället	20
2.3.1	Avdelningen för elektrisk energiomvandling (E2C), KTH	21
2.3.2	Piotr Lukaszewicz (ÅF)	21
2.3.3	Transrail	21
2.3.4	Oviedos Universitet, Asturien, Spanien	21
2.3.5	Jernbaneverket, Norge	22
2.3.6	Trafikverket, Sverige	22
2.3.7	IIT, Comillas, Madrid, Spanien	23
2.3.8	UIC, Chicago, IL, USA	23
2.3.9	Beijing Jiaotong Universitet, Beijing, Kina	23
2.3.10	LTU	24
2.3.11	Atkins	24
2.4	Publicerade eller inskickade dokument som resultat av projektet	25
2.4.1	Artiklar	25
2.4.2	Presentationer	25
2.4.3	Examensarbete	26
3	Genomförande	27
	Referenser	28

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

Historiskt har det funnits, och finns fortfarande, en stark korrelation mellan ökade/förenklade transporter och ekonomisk tillväxt. Järnvägen är det energieffektivaste transportmedlet på marken. Elektrifierade järnvägar möjliggör rent elektriska tåg, vilka är energieffektivare än exempelvis dieselelektriska tåg. I tider av ökat medvetande om begränsade energitillgångar och klimatavtryck är energieffektivitet av stor vikt.

Elektrifierade järnvägars energieffektivitet kan emellertid förbättras i flera avseenden. En stor andel av de existerande banmatningssystemen är gamla och behöver byggas ut för att klara av den växande trafiken. Vidare skulle en smartare drift av banmatningsnätet kunna utnyttja befintlig utrustning effektivare, vilket skulle leda till minskat energislöseri, förbättrad spänningskvalitet, samt tidsmässigt framskjutna behov av systemutbyggnad.

Alternativa matarledningslösningar, som till exempel HVDC-matarledningar med spänningsstyva strömriktare (VSC) är attraktiva eftersom de möjliggör kabelbaserade matarledningar vilket i sin tur leder till minskade markanvändningsbehov. Viktigast är dock att man med kabelbaserade matarledningar undgår svårigheterna med och tidsåtgången under tillståndsprocessen för att få bygga nya luftledningar.

På platser där banmatningssystemet frekvent är ansträngt, och där anslutningar till det matande allmänna nätet av olika skäl är fysikaliskt eller ekonomiskt omöjliga kan energilagringssystem utgöra attraktiva lösningar. För växelströmsjärnvägar kan också statiska var-kompensatorer (SVC) vara relevanta. I dagsläget används energilagring mestadels i spårvägssystem, men energilagring förekommer också i de spanska likströmsstambanorna, samt har föreslagits för de mer rurala delarna av de brittiska stambanorna.

Banmatningssystem avviker i många avseenden från de allmänna elnäten genom att gängse modellförenklningar inte kan användas i normalfallet [1]. Exempelvis kan linjäriseringar runt driftpunkter ofta med fördel användas i allmänna elnät, medan förändringar i banmatningens lastflöden är något radikalare. Mera konkret kan banmatningsomriktare variera i last från tomgång till märkeffekt på den tid det tar för ett tåg att passera, och spänningarna ute längs kontaktledningen kan variera mellan 0.8 p.u. och 1.15 p.u. utan att det ens räknas som extrema driftsfall.

1.2 SYFTE TILL VERKSAMHETSUPPDRAG

Syftet med projektet var att finna och utveckla metoder och modeller för förbättrad drift och infrastrukturdesign av banmatningssystem.

Grunderna för (pseudo)statisk modellering av banmatningssystem kan i dagsläget anses vara tillfredsställande. Vad som nu återstår är utveckla nya idéer att applicera på existerande modeller, samt att ytterligare utveckla dem. Syftet är att utreda hur framtida banmatningssystem kan designas för att optimera den dagliga driften.

Enligt Energimyndighetens beviljande av projektet är skälen till projektet följande:

Projektet syftar till modellutveckling och systemstudier av elektrifierad järnväg. Systemstudierna behandlar rörliga laster, och optimal drift kommer att studeras såväl för varje individuellt givet tidssteg, som över tid. Optimal drift av elsystemet kan alltså tillämpas som om operatören varken har minne eller aning om framtida lastsituationer, men även inkludera tidsaspekten. Modellutvecklingen behandlar förutom modeller för detaljstudier i tid och rum av järnvägssystem även förenklade modeller för förhållanden mellan tågtrafik och elsystemkonfiguration samt topplaster, energiåtgång och spänningsfallsgenererade gångtidsökningar. De senare modellerna ingår i vidareutvecklade modeller för investeringar i järnvägssystem.

1.3 PROBLEMBAKGRUND

Eftersom behoven av kapacitet för tågtrafiken förväntas fortsätta att öka betydligt på medelkort sikt i Sverige och resten av världen är det av vikt att det matande elkraftssystemet i järnvägen konstrueras så att det kan klara av denna framtida trafikbelastning.

Förutom att överhuvudtaget klara av framtida och nuvarande tåglaster – vilket är grundläggande – kommer önskemålen om energieffektiv drift av banmatningsnätet, samt kostnadseffektiv design av detsamma. Till detta kan tillkomma osäkerheter av ekonomisk karaktär, såväl som trafik- och teknik-mässiga osäkerheter relaterade till denna frågeställning. För en säker drift av ett banmatningssystem behöver även exempelvis tillförlitlighetsaspekter och korttidsinstabilitet beaktas, men detta görs i andra projekt.

1.4 HUVUDMAN & FINANSIERING

Projektet har finansierats av samverkansprogrammet ELEKTRA. Samverkansprogrammet ELEKTRA finansieras av Energimyndigheten (40 %) och industrin (60 %). Varje projekt i ELEKTRA finansieras således av Energimyndigheten (40 %) och industrin (60 %). Industri-intressenterna i ELEKTRA är Energiforsk (f.d. Elforsk), ABB (4 olika delar av ABB), Trafikverket och nkt Cable. Energiforsk representerar ett antal elföretag som valt att stoppa sin finansiering i en gemensam kassa. I ELEKTRA fungerar det så att varje industri-intressent "öronmärker" sina pengar till specifika projekt. I just detta projekt är industridelen delad lika mellan Energiforsk (f.d. Elforsk) 30 % och Trafikverket 30 %.

Gällande tidsplanen kan nämnas att projektet initialt var skrivet för och beviljat för två år heltid. Efter ett antal vändor blev projektet ett halvtidsprojekt. Ambitionerna har fått justeras därefter.

Projektet har utförts på KTH, avdelningen för elektriska energisystem. Ansvarig för projektet är Lennart Söder, avdelningschef. Forskare engagerad i projektet är Lars Abrahamsson, anställd som postdoktor (enligt centralt kollektivavtal) på avdelningen. I den rådgivande referensgruppen har förutom Lars och Lennart, representanter för projektets näringslivsintressenter, Anders Bülund och Niklas Biedermann från Trafikverket suttit. Niklas var gruppens ordförande. Ordföranden tas normalt ur intressentkretsen.

Under projekttiden har oregelbunden, men relativt tät kontakt hållits med såväl Anders som Niklas. Inledningsvis mer med Niklas, under slutet mer med Anders, beroende på ärendenas karaktär. Lars har närvarat på banmatningskonferenser, lokala,

nordiska, samt internationella akademiska. Lokala banmatningsseminarier har anordnats på KTH vid minst två olika tillfällen. Dessa har varit relativt välbesökta och även attraherat besökare från företag och institutioner inte direkt involverade i projektet, exempelvis ABB, Vattenfall, Atkins, och Bombardier. Kontakter med industri, andra intressenter inom akademisk banmatningsforskning, samt omkringliggande samhälle kommuniceras i detalj i Avsnitt 2.3.

2 Huvudresultat

2.1 RESULTAT OCH ERFARENHETER

2.1.1 Optimal placering av energilagringsutrustning i banmatningsnät

Lars har tidigare arbetat med optimal placering av inmatningspunkter i banmatningsnätet och är dessutom någorlunda familjär med att skriva optimeringsprogram. Álvaro hade genom utförda konsultuppdrag tillgång till en intressant fallstudie med tillhörande systemdata. Dessutom hade Álvaro stött på utmaningar i själva modellutvecklingen. Därför initierades ett samarbete där Álvaro står till hands med systemdata och Lars försöker lösa själva optimeringsproblemet noggrannare och effektivare.

Álvaro är doktorand på IIT, Comillas i Madrid, se även Avsnitt 2.3.7. Álvaros ursprungliga modell finns presenterad i [2]. Denna modell är renskriven och förbättrad, vilket resulterade i presentationen [3] på Joint Rail Conference 2014. Dessvärre har inte tiden infunnit sig för att sammanställa en tidskriftsartikel ännu.

Eftersom Lars hitintills huvudsakligen arbetat med AC-nät och i den mån han arbetat med DC-nät var det i omriktarstyrda matande DC-nät, underskattades den beräkningsmässiga komplexiteten som uppstår när återmatning till det publika nätet inte är möjlig. Detta följer alltså av att inmatningspunkterna utgörs av diodbaserade likriktare. Utan att gå in på allt för mycket tekniska detaljer insågs snart att linjära heltalsproblem inte alls nödvändigtvis är "lättare" för datorn att få tillfredsställande lösningar på än icke-linjära heltalsproblem. När problemen är beräkningsmässigt komplexa så visade sig lösaren CPLEX [4] vara oerhört känslig för sina parameterinställningar. Vissa slutsatser hann dras innan konferensen (JRC 2014) ägde rum, och efter det har frågeställningarna varit tvungna att läggas åt sidan av prioriteringsskäl.

Under "18th Nordic Seminar on Railway Technology" i Bergen knöts en kontakt mellan Lars och en italiensk professor, Carlo Mannino, numera verksam på SINTEF som var expert på linjärprogrammering såväl som insatt i järnvägsfrågor. Carlo fann ett stort intresse i ovan beskrivna problematik. Carlo bedömde att de ansatser och modellvarianter Lars föreslagit lät rimliga och lovande. Han lovade att Lars kunde kontakta honom med mera konkreta frågeställningar när han åter satte igång med denna forskningslinje.

Modellen planeras framgent att utökas till att även kunna placera energilagringssystem utefter (kontaktlednings)linjen, dock till en högre kostnad än för placering i samband med likriktarstationerna. Tekniskt sett är det bästa att placera energilagringen på avstånd från likriktarna för att få en så jämn spänningsprofil som möjligt.

2.1.2 Optimal tomgångsspänning för givna varierande tågtätheter

I [5] vidareutvecklas en av de olika energibesparande åtgärder för Madrids tunnelbana som föreslås i [6]. Denna åtgärd var att optimera tomgångsspänningen i syfte att få ned energiförbrukningen. Förslaget är att låta tomgångsspänningen bero på turtätheten. Det handlar helt enkelt om att när tågen går tätt och man har diodlikriktare och ingen energilagring i systemet så är det bra att hålla relativt hög tomgångsspänning. Hög tomgångsspänning sänker överföringsförlusterna, samtidigt som de återmatande tågen

ändå har elektriskt korta avstånd till effektkonsumerande tåg i händelse av återmatning. Elektriskt korta GGG avstånd begränsar risken för överspänningar. När å andra sidan tågen går glest så motverkar en för hög tomgångsspänning återmatningsförmågan då avståndet mellan (återmatande) bromsande tåg och gasande (konsumerande) tåg kan vara långt. Dessutom är vid gles trafik den totala lasten per likriktare lägre, så även om man sänker tomgångsspänningen något kommer det inte leda till allt för stora spänningsfall nära lasterna.

Resultaten härifrån är bra indicium på att i en framtida realtidsstyrning av ett smart banmatningsnät bör man ta hänsyn till den aggregerade lasten som berör varje inmatningspunkt.

Studien gäller ett nät med nominell spänning 750 V. De optimala tomgångsspänningarna som funktion av tågens avgångstätheter avtar från 830 V vid ett tåg var 4:e minut till 780 V vid ett tåg var 9:e minut. Därefter blir den optimala spänningen konstant på 780 V för glesare tågavgångar. Resultaten från studierna visar att om nätkodex tillät det skulle det vara optimalt med ännu lägre tomgångsspänningar vid gles trafik än den föreslagna lösningen ger. Rent matematiskt, om man bortser från nätkodex, planar den optimala spänningsfunktionen i stället ut vid 760 V för avgångar var 12:e minut eller glesare.

2.1.3 Lastdelning och optimal spänningsstyrning för omformarstationer med roterande omformare

Under tidigare diskussioner med Trafikverket har ett intresse funnits att effektivare kunna styra effektlöden i banmatningsnätet även där det huvudsakligen matas via roterande omformare. Roterande omformare tillåter inte direkt och oberoende styrning av aktiv och reaktiv effekt. Det handlar alltså huvudsakligen om att kunna aktivera och inaktivera en eller flera omformare i en station vid rätt tillfällen för att genom omformarstationens relativa styrka i nätet reglera hur mycket effekt som kommer att matas ut från respektive omformarstation.

En första ansats gjordes redan 1999 i [7], där modellerna var väldigt förenklade elektrotekniskt sett, men å andra sidan togs hänsyn till kostnaderna vid aktivering/inaktivering. Då dagens datorer tillåter större detaljrikedom är modellerna i [8] i full detalj givet statisk lastflödesmodellering. Bortsett från effektlöden i själva banmatningsnätet så tas hänsyn till omformarnas omvandlingsförluster, till tomgångsförlusterna, samt till ledningsförluster. Dock lämnades tidsdimensionen, och hänsyn till kostnader för i- och urkoppling av omformare till framtida studier. I sådana studier bör även det tredje driftsläget från [7] tas med, där omriktaren "varmhålls" genom att vara aktiverad och inkopplad på det matande nätets sida och satt i rotation, men urkopplad på järnvägssidan. Detta minskar tomgångsförlusterna jämfört med full inkoppling, och minskar återaktiveringskostnaden jämfört att helt inaktivera enheten.

Förutom aktivering/inaktivering som huvudsaklig effektstyrningsmetod användes i [8] även viss finjustering genom aktivare styrning av spänningskomponderingen. Här behöver dock fortsatta studier utreda säkerheten och noggrannheten i denna styrning, samt övriga tekniska begränsningar.

De optimala lastflödesmodellerna för banmatningsnät med omformarstationer bestående av roterande omformare ingår i den långsiktiga målsättningen att kunna realtidsstyra banmatningsnätet på ett smart sätt i någon form. Som även diskuteras i artikeln [8] finns fler utmaningar gällande optimalt nyttjande av roterande omformare,

jämfört med statiska omriktare. Som några exempel kan nämnas att hänsyn till tidsaspekten behöver tas i optimeringen då omformare kan överlastas termiskt i stor utsträckning under korta tidsperioder, samt att energiförlusterna i samband med aktivering/inaktivering inte är att försumma.

De resultat Lars presenterade i Bergen [9], är att betrakta som en förstudie till det som senare blev [8].

2.1.4 Elkraftsystemsplugin till mekaniska tågsimulatorer

Det finns två huvudsakliga ansatser att modellera rörliga laster och trafik i banmatningssystem:

- Den första, vilket också är den vanligare och enklare är att man först gör en beräkning på effekt och energikonsumtion som om tågen vore "dieseldrivna", dvs. utan att ta hänsyn till elsystemet och de begränsningar det sätter på tågdriften och tågframföringen. När detta är gjort har man färdiga uppsättningar av tåglaster och tågpositioner för varje tidssteg. Dessa uppsättningar kan sedan sättas in i beräkningsprogram för elkraftsystem. För starka nät som sällan överbelastas och som håller spänningarna nära märkspänning medför detta inget större problem. I många generella fall, mer specifikt i Skandinavien, är detta en förenkling som inte alltid håller.
- Den andra är något mer beräkningsintensiv, men också mer exakt. Den används av t.ex. [10, 11, 12], och även av vissa kommersiella mjukvaror, som exempelvis TracFeed Simulation. Här tas hänsyn till elnätets begränsningar i fråga om installerad effekt i inmatningspunkter (i Sverige omformar-/omriktarstationer), överspänningar som begränsar möjligheten till återmatad bromseffekt, samt underspänningar som begränsar dragkraftförmågan eller drageffekten.

Inom projektet handleddes ett examensarbete [13], som utfördes hos och åt Transrail. Transrail har en mjukvara, TRAINS [13, 14], baserad på den första ansatsen ovan. Transrail ville få utrett möjligheten att kunna bygga ut mjukvaran TRAINS med en plugin som varnade för om trafikplanerna som räknades fram av TRAINS blev för optimistiska när man tog hänsyn till elnätet. Examensarbetet lade grunden för detta genom att identifiera otillåtna tåglaster.

Ett otal uppslag har identifierats på hur vidareutveckling mot målet om en plugin till mekaniska tågsimulatorer kan ske. Huvudsakligen kan det antas kunna möjliggöras på tre sätt;

1. Med gravt förenklade elsystemsmodeller som inkluderas i den huvudsakligt mekaniska modellen utan att komplicera beräkningarna allt för mycket.
2. Iterativt, genom att man straffar vissa lösningar som inte är elektriskt genomförbara, och hoppas att den mekaniska tågmodellen tar fram en annan, nästan lika bra modell ur ett rent mekaniskt perspektiv som fungerar för elnätet. Detta upprepas tills konvergens uppnås.
3. Med parameterskattade strafffunktioner som sätts in i den mekaniska modellen. Funktionerna skapas av en erfarenhetsdatabas som byggs upp genom gjorda simuleringar. Dessa ska i sin tur användas för att på ett aggregerat sätt beskriva lastsituationer som elnätet troligtvis inte kommer att klara av.

Det är dock oklart i dagsläget om det finansiella intresset för sådan utveckling finns idag.

Transrail verkar vara inne i en ekonomisk svacka, och KTH/EPS har ingen kontakt med internationella aktörer som både har intresse för detta och inte redan har diverse metoder att hantera frågan. Lars opponent på hans disputation, Arnd Stephan, har medverkat i utvecklingen av en kommersiell mjukvara, Open Power Net [15, 16] som är en plugin till trafikplaneringsprogrammet Open Track [17]. Det finns dock i dagsläget inga öppna, akademiskt publicerade, modelleringsansatser för elkraftplugin till mekaniska tågsimulatorer.

2.1.5 Optimal styrning av reaktiva effekter i asynkronloken i banmatningssystemet

I examensarbetsprojektet [13] ingick även studier av optimal styrning av malmpanelokens, IOREs, reaktiva effekter på nätsidan om lokomriktaren. Detta gjordes i syfte att i första hand underlätta uppfyllnaden av den ursprungliga körplanen, om nätet visade sig vara för svagt för körplanen även under normal drift. I andra hand gjordes det för att minimera effektförbrukningen. Beräkningsresultat indikerar att användning av reaktiv effekstyrning i loken kraftfullt reducerar banmatningssystemets känslighet för bortfall av omformarstationer. Resultaten från exjobbet sammanfattades i kortform i konferensartikeln [14] i syfte att sprida resultaten internationellt.

Att i ett framtida smart banmatningsnät inte bara styra effektfloden via inmatningspunkterna, utan också genom att på olika sätt kontrollera lasterna (dvs. tågen) har varit en uttalad ambition i detta postdoktorsprojekt. Tack vare exjobbprojektet [13] gavs möjligheten att demonstrera potentialen med reaktiv styrning i ett faktiskt existerande system, Norra Malmbanan.

De tydligaste fördelarna med reaktiv styrning är att man så att säga kan "lyfta upp sig själv i håret/skägget". Där spänningen normalt sett är för låg för önskat effekttag kan man helt enkelt producera reaktiv effekt för att höja spänningen tillräckligt för att loket ska kunna ta ut önskad aktiv effekt. Omvänt gäller att man konsumerar reaktiv effekt för att sänka kontaktledningsspänningen tillräckligt för att kunna återmata önskad mängd aktiv effekt vid inbromsning.

Här är det viktigt att skilja på om den optimala styrningen görs med samhällets bästa i beaktande, eller enskilda trafikoperatörers bästa i åtanke. Det finns inget samhällsintresse med att maximera den återmatade effekten om det sker till priset av ökade nätförluster eller omvandlingsförluster i loket. Objektsfunktionen i ett optimeringsproblem bör således vara den totala inmatade effekten. En enskild förare eller operatör har däremot en vilja att minimera sin egen aktiva konsumtion med klassiska prissättningssystem.

Nästa steg, efter att ordentligt ha dokumenterat och eventuellt justerat de framtagna modellerna, är att titta på hur detta kan anpassas till modeller och styrstrategier för optimering av den reaktiva effekten i realtid. I framtida studier ingår också att utvärdera i vilken mån nätkodex kan anpassas för ett effektivare utnyttjande av banmatningsnätet. Detta gäller såväl nationella som internationella föreskrifter. En viss diskussion om nätkodex förekommer i [14], men djupare analys är troligen nödvändig.

2.1.6 Tillförlitlighetsanalys av banmatnings-omriktare/-omformare

Normalt sett, gällande tillförlitlighet i elkraftsystem studeras huruvida ett effektbehov kan komma att tillfredsställas vid bortfall av komponenter i systemet. Här har en utmaning varit att just kvantifiera tågens behov av elektrisk effekt, samt att utvärdera i

vilken mån en bortfallen omriktare/-formare leder till ouppfyllda behov utan att göra en regelrätt lastflödesanalys på kraftsystemet. Det senare kravet kommer implicit från doktorandprojektet [18] som har varit mer inriktat på databashantering än kraftsystemanalys.

Lars blev under vårterminen 2014 kontaktad av Yasser Mahmood, doktorand på LTU inom tillförlitlighet av banmatningsomriktare och banmatningsomformare. Yasser behövde input gällande vissa forskningsidéer och resultat, samt rådfrågning inom kraftsystemområdet. Lars bidrog med kunskande inom banmatning, språkbearbetning, samt allmänt tekniskt resonemang. Lars fick en inblick i tillförlitlighetsforskning, ett område han tidigare inte varit verksam inom. Niklas Fransson på Trafikverket har bidragit med effektivt, koncist och ovärderligt tekniskt stöd under denna process.

Från resultaten i [19] kan slutsatsen dras att man med relativt enkla mått för att kvantifiera tåglasterna i kombination med tillförlitlighetsdata för omformare och omriktare kan förutsäga var sannolikheten för elsystemsinducerade tågförseningar kommer att äga rum.

Utifrån resultaten i [19] och [20] från [18] har behov av ytterligare studier kunnat identifieras. Utifrån [19] handlar det huvudsakligen om att optimalt kunna omfördela och planera för elektrisk energiomvandlingskapacitet med avseende på tillförlitligheten. Utifrån [20] handlar det om korrekt parameterskattning kombinerat med att korrekt kombinera databaser och tillförlitlighetsmodeller. Vidare kan det finnas ett generellt behov att gå in i kraftsystemtekniska detaljer gällande vilka komponentbortfall som leder till ickeuppfyllda effektbehov, samt för att värdera de praktiska konsekvenserna av detta i fråga om utfall på tågföringen.

2.2 MÅLUPPFYLLELSE

I detta avsnitt behandlas de beslutade projekt- och effektmålen. Målgruppsbeskrivning finns huvudsakligen i Avsnitt 1.4 och behandlas inte i detta avsnitt. Vilka organisationer och grupper av personer som deltagit, vilka som har påverkats, haft nytta av projektets verksamhet etc. redovisas i detalj i Avsnitt 2.3 och kommer således inte att behandlas i detta avsnitt.

2.2.1 Målen enligt dokument från Energimyndigheten (Dnr: 2013-004247)

Projektet omfattar två områden – som delvis överlappar varandra.

Det första området behandlar modellutveckling och optimal drift av järnvägens kraftsystem. Detta område omfattar också numeriska studier för att visa fördelarna med t.ex. aktiv styrning av omvandlare för ströminmatning såväl som lokens omvandlare, installation av transmissions-, samt DC-kablar för matning av järnvägen.

Det andra området är den optimala utformningen av järnvägssystemets strömförsörjning, och innebär en steg-för-steg-modellutveckling från optimal utformning i ett tekniskt perspektiv till optimala investeringar i kraftsystemet där hänsyn tas till teknisk-ekonomiska begränsningar. Ekonomiska aspekter införs allt eftersom, vilket krävs för att kunna studera investeringar över tiden på ett relevant sätt, eftersom budgeten som ges ofta är årlig eller baseras på andra, givna perioder. När sådana modeller är stabila, kan osäkerheter introduceras till investeringsmodeller.

Viktiga uppgifter som ska utföras är:

1. Att föreslå långsiktiga realiserbara strategier för att driva ett framtida optimalt kontrollerat järnvägsenergisystem.
2. För att ytterligare förbättra rörliga lastmodeller och tillämpa dessa modeller på utmanande och visionära problem.
3. Att utveckla och generalisera de modeller som erhållits för optimal design och konfiguration av järnvägsenergisystem.

2.2.2 Målens uppfyllelse

Det första området

Gällande "modellutveckling och optimal drift av järnvägens kraftsystem" så behandlas dessa frågor huvudsakligen i publikationerna och presentationerna [21, 5, 8, 14].

I [21] behandlas frågor liknande de som behandlades i examensarbetet [22] och i den sammanfattande konferensartikeln [23], men här har studien utökats till att med hjälp av de matande omriktarna även hålla spänningarna så nära nominell utspänning som möjligt. Det visar sig att den föreslagna HVDC-lösningen klarar spänningshållning bra, precis som i fråga om förlustminimering.

I [5] vidareutvecklas en av de olika energibesparande åtgärder för Madrids tunnelbana som föreslås i [6]. Denna åtgärd var att optimera tomgångsspänningen. Förslaget är att låta tomgångsspänningen bero på turtätheten. Resultaten härifrån är bra indicium på att i en framtida realtidsstyrning av ett smart banmatningsnät bör man ta hänsyn till den aggregerade lasten som berör varje inmatningspunkt.

I [8] demonstreras nya exakta modeller för optimal aktivering och deaktivering av roterande omformare i en omformarstation för optimal lastdelning med avseende på en för banmatningssystemet i sin helhet minimal effektkonsumtion. Modellerna inkluderar relativt detaljerade förlustmodeller för roterande omformare utgående från beskrivningen i [24]. I ett andra steg i artikeln [8] utökas styrbarheten till att även gälla en variabel spänningskompounding. Med denna ökade den möjliga graden av belastning på systemet avsevärt, samt känsligheten för omformarbortfall reducerades. Dock bör modellen för spänningsstyrning här ses över innan allt för stora slutsatser dras. Utan att gå in på allt för mycket detaljer handlar det om vilka spänningsnivåer som man skall anta vara tillåtna för att undvika skador på nätet eller utrustningen, samt huruvida modellen ska styra spänningen på omformarstationsnivå eller på varje individuell omformare.

I [14] visas på att reaktiv effekttstyrning i loken leder till lägre aktiv effektinmatning från det matande nätet, ökad och säkrad återmatning, samt bättre redundans vid bortfall av omformarstationer. Det sistnämnda är tekniskt ekvivalent med att man kan fördröja framtida kapacitetsutbyggnad i fråga om energiomvandlingsförmåga. Med en optimal styrning av den reaktiva effekten i loken visade fallstudien att man skulle klara driften med en omformarstation färre än idag. Studien är gjord på en modell av norra delen av Malmbanan.

Studien [14] visar också en framkomlig väg gällande att skapa en plugin för tågsimuleringsprogramvara som idag inte tar hänsyn till banmatningssystemet i detalj. Denna plugin ska varna eller på annat sätt indikera för huvudprogramvaran om en lösning inte är elektriskt möjlig eller önskvärd.

Det andra området

Gällande "optimala utformningen av järnvägssystemets strömförsörjning" så behandlas dessa frågor huvudsakligen i [3, 19].

I [3] har en blandad linjär heltalsmodell för optimal placering av energilagringssystem i ett likströmsbanmatningssystem tagits fram. Fallstudien är inspirerad av en linje i Madrids tunnelbana. Utfallen i resultaten beror på hur många energilagringsstationer man har "råd" och teknisk möjlighet att placera ut, samt trafikmängden gällande möjlig placering. Det kan dock finnas praktiska begränsningar som exempelvis utrymmesskäl.

Modellen tillåter även optimering av spänningsgränser för när energilagret ska aktiveras för uppladdning respektive urladdning. Resultat från det senare finns däremot inte publicerat. Modellen kan även relativt enkelt expanderas till att beakta placering av omriktare som ersätter eller kompletterar (även växelriktare möjligt i detta fall) befintliga likriktarstationer.

För en något djupare problembeskrivning av projektet bakom [19], vänligen se Avsnitt 2.1.6. Med hjälp av resultaten i [19] bör man kunna förbättra designen av ett existerande system på relativt kort sikt genom att via omflyttning av energiomvandlande enheter minimera risken för effektbortfall som påverkar tågdriften. I ett sådant optimeringsproblem skulle de fria variablerna vara de existerande omformarnas och omriktarnas placering i respektive omformar-/omriktarstationer. Med prognoser på framtida trafikmängder kan man planera för omflyttning av befintliga existerande omformare/omriktare, men även placera för eventuella inköp av extra enheter, eller om så förefaller prisvärt, även utökning av antalet stationer för energiomvandling. Från resultaten i [19] kan man tydligt se att approachen från [12] att förenklat behandla tåglasterna genom att räkna antalet tåg i trafik håller i stora stycken. Att räkna antalet tåg i trafik på en banmatningssträcka är ett relativt enkelt, men ofta tillräckligt mått på belastningsnivån på banmatningssystemet.

Viktiga uppgifterna i numrerade listan

Gällande den numrerade listan så har "punkt 1" (strategier för att driva en framtida optimalt kontrollerad järnvägsenergisystem) behandlats i de arbeten som täcker "det första området" (modellutveckling och optimal drift av järnvägens kraftsystem). "Punkt 2" (förbättra rörliga lastmodeller och tillämpa dessa) har behandlats i [5, 3] där rörliga FFFFF tunnelbanelaster beaktas, samt i [13, 14] där tidtabeller och tågmodeller från norra delen av Malmбанan beaktas. "Punkt 3" (optimal design och konfiguration av järnvägsenergisystem) har behandlats i de arbeten som täcker "det andra området" (optimala utformningen av järnvägssystemets strömförsörjning).

2.3 EFFEKTER I SAMHÄLLET

Detta projekt har inte resulterat i några rena produkter, vilket inte heller var utgångspunkten. Därför kan man säga att de huvudsakliga samhällseffekterna rimligen sker inom nätverksskapande och informationsöverföring. Nedan listas uppkomna och underhållna nationella och internationella kontakter i såväl akademi som näringsliv under projektperioden.

Kontakterna nedan kommer i en slumpvis inbördes ordning. Ingen värdering föreligger således, utan ordningen beror enbart på detta dokument organiska framväxt.

2.3.1 Avdelningen för elektrisk energiomvandling (E2C), KTH

Lars inledde i slutet av sin doktorandperiod ett samarbete med Stefan Östlund på E2C. Även under postdoktorstiden har sampublicationer skett, där Stefan huvudsakligen bidragit med kritisk granskning av själva slutprodukten, dvs. artiklarna [8, 3, 5], men även i diskussioner i fråga om forskningsidéerna är branschmässigt relevanta.

Stefan har även agerat bollplank i fråga om mer långsiktiga och strategiska frågeställningar. Det är via Stefan som Lars kom i kontakt med Järnvägsgruppen på KTH.

Lars har närvarat på något av FIFFIs möten. FIFFI står för Integrerad Fordons- och Infrastrukturutveckling inom FFI, och FFI – Fordonsstrategisk Forskning och Innovation – är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings-, innovations- och utvecklingsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Säkerhet. Mats Leksell från E2C har haft hög närvaro på dessa möten. Lars och Mats har gemensamt diskuterat vissa elvägsfrågor. Det är ännu oklart om detta leder till något konkret framtida projekt eller inte. I så fall kommer troligen E2C stå för motor/maskin-biten och EPS (elektriska energisystem) för kraftsystembiten.

2.3.2 Piotr Lukaszewicz (ÅF)

Egentligen kanske kontakten med ÅF är mer en kontakt med Piotr. Under den tid detta projekt löpt har han agerat som gästprofessor på Comillas (mer om Comillas i Avsnitt 2.3.7) och som konsult på ÅF. Piotr lämnade Transrail i samband med att detta postdoktorsprojekt officiellt startade upp.

Piotr har även deltagit i inledande diskussioner om samarbete med KTH i EU-projektet Merlin (FP7), vilket dock för Sveriges del inte fick höjd eller volym nog för att kunna rättfärdiga KTHs deltagande.

Piotr har varit behjälplig i allmäntekniska diskussioner inom teknikområdet, samt varit aktiv i uppstartsdiskussionerna kring banmatningsforskning via EU-projektet Shift2Rail (Horizon 2020).

2.3.3 Transrail

Lars har haft en del kontakt med Transrail, framförallt inför och under den aktiva fasen i examensarbetet [13].

Under projektperioden har även eventuella samarbeten och forskningsfinansieringsmöjligheter diskuterats med Transrail. Diskussionerna har huvudsakligen förts med Mario Lagos.

2.3.4 Oviedos Universitet, Asturien, Spanien

Under postdoktorstiden kom Lars via en artikelgranskning i kontakt med forskargruppen "LEMUR" på Oviedos Universitet i Asturien (i Norra Spanien), huvudsakligen med Pablo Arboleya. Deras elkraftsgrupp bedriver en förhållandesvis

stor andel forskning inom banmatningsområdet. Lars har en stående inbjudan att komma dit och gästforsa, men Lars har inte funnit att den tiden funnits, dessvärre.

Pablo var till KTH på en kortvisit vårvintern 2014. Lars deltog i en EU-ansökan om forskningspengar som dessvärre inte gick igenom.

Pablo sökte pengar internt på sitt lärosäte för att kunna besöka KTH för att diskutera kursutveckling och framtida forskningssamarbeten. Han nekades medel och besöket ställdes in.

2.3.5 Jernbaneverket, Norge

Lars har under åren haft en del kontakt med Jernbaneverket på elkraftsidan, dock har kontakterna tunnats ut med åren. Senast Lars besökte dem var 11 juni 2013 på deras elkraftsdag, då forsknings- och utvecklingsidéer diskuterades. Under det mötet hölls bland annat presentationen [25].

Ett "motbesök" på KTH gjordes den 15 oktober 2013 av Steinar Danielsen från Jernbaneverket som höll ett välbesökt seminarium om kraftsystemdynamik i banmatningen. Järnvägsystemets specifika karaktär, och kraven på genomtänkt modellering var nog en ögonöppnare för många i publiken.

2.3.6 Trafikverket, Sverige

Lars har under åren haft en del kontakt med huvudsakligen Anders Bülund och Niklas Biedermann. Under senare år har kontakt upprätthållits med Björn Ållebrand gällande John Laurys exjobb (innan detta postdoktorsprojekt startade), och nu senast (vårterminen 2015) om Elforsks program för Smarta Elnät. (Även Catarina Naclér på Fortum har visat intresse för studier gjorda på elektriska fordons påverkan av elnätet.)

I samband med diskussionerna under doktorandtiden att Lars eventuellt skulle använda mjukvaran TracFeed Simulation [26, 27], och i samband med exjobbet [28] hölls under en tid intensiv kontakt med Peter Deutschmann.

Under senaste året har Lars varit i kontakt med Anders Bülund och Sam Berggren gällande Lars och KTHs eventuella deltagande i banmatningsdelarna av EU-projektet Shift2Rail.

Via LTU-doktoranden John Laurys doktorandprojekts referensgrupp (se Avsnitt 2.3.10, Skellefteå-delen) har Lars kommit i kontakt med Mats Häger. I samband med att Lars kontaktades för att hjälpa LTU-doktoranden Yasser Mahmood (se Avsnitt 2.1.6 och 2.3.10, Luleå-delen) upprättades en kontakt med Niklas Fransson.

Under våren 2013 (10 april) besökte Lars Abrahamsson Trafikverket i Borlänge och Lars Dicander för att få lite detaljerad information om GELD (Gemensamt ELDriftledningssystem) för att bättre veta vilken typ av data man i realiteten kan ha tillgång till vid realtidsstyrning av banmatningen.

Lars Abrahamsson var under hösten 2014 inbjuden att hålla en presentation på Trafikverkets FoI-dag, där presentationen [29] hölls. Lars var även inbjuden till motsvarande evenemang på våren 2015, den 21 maj, men kunde av familjerskäl inte närvara.

2.3.7 IIT, Comillas, Madrid, Spanien

Under doktorandtiden knöts kontakter med banmatningsforskningen på IIT, Comillas, i Madrid. Eduardo Pilo, som varit lektor på Comillas, men även gästforskare på University of Illinois i Chicago blev tack vare Stefan Östlunds kontakter utsedd till redaktör för banmatningsdelen av "IEEE Electrification Magazine", en bra kontakt ut i internationell branschindustri. Eduardo är för tillfället konsult inom banmatning, samt deltidslärare på Comillas.

Under en dryg vecka hösten 2013 besökte Lars Comillas och Álvaro López för att initiera ett samarbete. Álvaro López är en snart färdig doktorand inom banmatning. Där ombads Lars av Ramon Pecharromán, Álvaros huvudhandledare, att hålla presentationen [30].

Álvaro forskar huvudsakligen på tunnelbaneelsystem. Lars höll en presentation på Joint Rail Conference 2014 om optimal placering av energilagringssystem i ett tunnelbanesystem [3], som när tid ges skall bli en tidsskriftsartikel. Álvaro presenterade en artikel [5] på samma konferens. Artikeln handlade om adaptiv tomgångsspänning för energieffektivare tågdrift. Artikeln bygger på ett forskningsuppslag från Lars, men närliggande idéer har även dryftats mellan Lars Abrahamsson och Niklas Biedermann under 2012.

Álvaro besökte KTH under perioden 13 januari till 11 april 2014. Álvaro kom i kontakt med Järnvägsgruppen på KTH genom att närvara på, och hålla en kort presentation på deras möte den 21 februari 2014. Under Álvaros vistelse på KTH hölls den 20 mars 2014 ett banmatningsseminarium med 13 deltagare, där Álvaro pratade om sitt doktorandprojekt och där Bertil Klerfors (aktiv pensionär, f.d. ABB Corporate Research) pratade om alternativa fasbalanseringslösningar för transformatormatade järnvägar som drivs i samma frekvens som det matande nätet.

Doktoranden William Carvajal, aktiv inom EU-doktorandprogrammet SETS, besökte avdelningen för elektriska energisystem på KTH mellan augusti 2014 och mars 2015. Williams huvuduniversitet är Comillas. William sattes precis som Álvaro i kontakt med KTH:s järnvägsgrupp och läste även kurser på Anders Lindahls avdelning. William arbetar med energieffektiva körstilar, men utan att beakta banmatningssystemets begränsningar.

2.3.8 UIC, Chicago, IL, USA

Lars passade på att besöka Eduardo Pilo (se även Avsnitt 2.3.7) på University of Illinois i Chicago (UIC) efter Joint Rail Conference i april 2014. Där diskuterades framtida forskningsidéer med hans (dåvarande) professor Sudip K. Mazumder under två dagar. Ett försök gjordes även att söka amerikanska forskningsmedel, men ansökan avslögs senare. Sedan Eduardos tjänst på UIC upphörde har kontakten med UIC reducerats.

2.3.9 Beijing Jiaotong Universitet, Beijing, Kina

Elektroskolan på KTH besöktes 25 september 2014 av en grupp forskare och professorer, varav några jobbade med banmatningsfrågor. Lars träffade dem över en lunch, och hade diskussioner med dem under eftermiddagen. Det verkar inte ha resulterat i något konkret så här långt.

2.3.10 LTU

Campus Luleå

Under vårterminen 2014 blev Lars kontaktad av Yasser Mahmood, en (numera disputerad) doktorand på LTU, campus Luleå, som forskade på tillförlitlighet hos järnvägsomriktare. Han hade kört fast lite, bland annat eftersom han satt på en institution som visserligen jobbar med tillförlitlighetsfrågor, och järnvägsfrågor, men inte med elkraftsfrågor, och synnerligen inte med banmatning. Yasser har besökt Lars på KTH en gång, och Lars har besökt honom på LTU en gång. Lars har även pratat med honom och hans handledare över Skype och telefon, samt träffat hans handledare på "18th Nordic Seminar on Railway Technology" i Bergen hösten 2014.

Den upprättade kontakten och forskningssamarbetet resulterade i en inskickad tidskriftsartikel [19] där Lars är medförfattare. Lars bidrag består av hjälp med den språkliga biten, den elkraftsmässiga biten, samt viss teknisk och logisk argumentation i artikeln. Här bör också Niklas Fransson på Trafikverket omnämnas. Utan hans hjälpsamma diskussioner med Lars hade Lars inte kunnat hjälpa Yasser lika bra. Lars har även granskat andra artiklar som Yasser skickat till tidskrifter, men det vet Yasser inte, och ska inte heller veta (även om han nog kan ana) då granskningen ju ska vara hemlig.

Inför Yassers disputation tipsade Lars honom om lämpliga professorer att ha med i betygsnämnden. Bland annat Stefan Östlund från KTH och Math Bollen från LTU satt med där i slutändan. Stefan har gedigen kunskap och erfarenhet i banmatningsfrågor. Math har en bakgrund i tillförlitlighetsforskning, samt leder en grupp som bland annat fokuserar på banmatningsforskning.

Campus Skellefteå

Slutligen, parallellt med detta postdoktorsprojekt drogs ett doktorandprojekt igång på LTUs campus i Skellefteå: "Operation of large power systems with small amounts of physical inertia". Detta projekt var ursprungligen tänkt att mera allmänt behandla elnät som huvudsakligen var beroende av kraftelektronik – typiskt järnvägen och vindkraften. I samband med turbulensen kring Elektra så omvandlades det till ett renodlat banmatningssystemprojekt. Doktoranden, John Laury, är en före detta exjobbare [22] som Lars handledde och Stefan Östlund examinerade.

Sedan 1 januari 2014 bihandler Lars officiellt John. Inofficiellt blev Lars inkopplad redan den 8 september 2013. Lars har nu, under vårterminen 2015 gått (och avslutar i dagarna) en forskarhandledningskurs, såväl för egen meritering som för att kunna handleda John (och förhoppningsvis fler framtida doktorander) bättre. Lars var medförfattare till Johns NORDAC-artikel [21] från hösten 2014 som byggde vidare på examensarbetet.

2.3.11 Atkins

Lars har behållit kontakten med Thorsten Schütte som satt i referensgruppen för hans Elektra-doktorandprojekt. Thorsten är en stor idémässig inspirationskälla och kunskapsbank. Lars har även viss kontakt med Thorstens kolleger i Västerås, Danmark och i Kalifornien. Atkins kommer troligen jobba med Kaliforniens höghastighetsjärnvägsprojekt.

2.4 PUBLICERADE ELLER INSKICKADE DOKUMENT SOM RESULTAT AV PROJEKTET

I detta avsnitt listas dokument som producerats som resultat av projektet. Förutom dokument som Lars Abrahamsson aktivt författat finns här även ett examensarbete som Lars handlett.

2.4.1 Artiklar

- Y. A. Mahmood, L. Abrahamsson, A. Ahmadi, and A. K. Verma, "Reliability evaluation of traction power capacity in converter-fed railway systems", *IET Generation, Transmission and Distribution*, no. ISSN: 1751-8687, 2015. Submitted article.
- L. Abrahamsson and S. Östlund, "Optimizing the power flows in a railway power supply system fed by rotary converters", *2015 Joint Rail Conference*, DOI: 10.13140/RG.2.1.4322.5128, San José, CA, USA, March 2015.
- L. Abrahamsson, R. Skogberg, S. Östlund, M. Lagos and L. Söder, "Identifying electrically infeasible traffic scenarios on the Iron Ore Line – Applied on the present-day system, converter station outages, and optimal locomotive reactive power strategies", *2015 Joint Rail Conference*, DOI: 10.13140/RG.2.1.3798.2242, San José, CA, USA, March 2015.
- J. Laury, M. Bollen, L. Abrahamsson, and S. Östlund, "Some benefits of an HVDC feeder solution for railways", *NORDAC 2014*, Stockholm, Sweden, Sep. 2014.
- Á. J. López-López, L. Abrahamsson, R. R. Pecharromán, A. Fernández-Cardador, P. Cucala, S. Östlund and L. Söder, "A Variable No-Load Voltage Scheme for Improving Energy Efficiency in DC-Electrified Mass Transit Systems", *2014 Joint Rail Conference*, DOI: 10.1115/JRC2014-3818, Colorado Springs, CO, USA, April 2014.
- L. Abrahamsson and L. Söder, "An SOS2-based moving trains, fixed nodes, railway power system simulator", in *WIT Transactions on the Built Environment*, vol. 135, pp. 813-823, WITPress, 2014. (presenterades 2012, men publicerades 2014)
- J. Laury, L. Abrahamsson, and S. Östlund, "OPF for an HVDC Feeder Solution for the Railway Power Supply System", in *WIT Transactions on the Built Environment*, vol. 135, pp. 803-812, WITPress, 2014. (presenterades 2012, men publicerades 2014)

2.4.2 Presentationer

- "Optimal Placement of Energy Storage Systems with Regards to Energy Consumption: A Case Study Applied on a Representative Metropolitan DC Railway for Passenger Traffic", Oral presentation only, *2014 Joint Rail Conference*, DOI: 10.13140/RG.2.1.5190.8644, Colorado Springs, CO, USA, April 2014.
- "Optimizing the power flows in a railway power supply system fed by rotary converters", *2015 Joint Rail Conference*, DOI: 10.13140/RG.2.1.2045.-1366, San José, CA, USA, March 2015.
- "Identifying electrically infeasible traffic scenarios on the Iron Ore Line – Applied on the present-day system, converter station outages, and optimal locomotive reactive power strategies", *2015 Joint Rail Conference*, DOI: 10.13140/RG.2.1.2569.4245, San José, CA, USA, March 2015.
- "Optimal Operation of Railway Power Supply Systems", *18th Nordic Seminar on Railway Technology*, DOI: 10.13140/RG.2.1.4142.2888, Bergen, Norway, Oct. 2014.
- "Railway, energy efficient traffic (Original title in Swedish: Järnväg, energieffektiv trafikerings)", *The Swedish Transport Administration's R&D Day (Swedish title:*

Trafikverkets FoI-dag), DOI: 10.13140/RG.2.1.3093.7122, Stockholm, Sweden, Sept. 2014.

- "Optimization of railway power supply systems - operation and design", *The Power System Day of the Norwegian Railway Administration*, DOI: 10.13140/RG.2.1.3624.1443, Oslo, Norway, June 2013.
- "Improved railway power supply by the use of converters", *Presentation made as a visiting researcher at IIT Madrid*, DOI: 10.13140/RG.2.1.4148.-4321, Madrid, Spain, Oct. 2013.

2.4.3 Examensarbete

- R. Skogberg, "Railway power supply system models for static calculations in a modular design implementation – Usability illustrated by case-studies of northern Malmбанан", Master's thesis, KTH (Royal Institute of Technology), 2013. XR-EE-ES 2013:006, URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:839614/FULLTEXT01.pdf>.

3 Genomförande

Projektet kan delas upp i en forskningsdel och i en spridningsdel. Spridningsdelen och dess genomförande kan anses vara avhandlad i Avsnitt 2.3. Forskningsdelen har huvudsakligen bedrivits i olika former av kontors-/datormiljö.

I de fall Lars utgjort den exekutiva delen av forskningen har beräkningar utförts i MATLAB och/eller GAMS [31]. MATLAB får anses relativt känt inom ingenjörbranschen. GAMS är ett generellt algebraiskt modelleringsverktyg, som huvudsakligen används för att lösa (vanliga) ekvationssystem, samt optimeringsproblem (underbestämda ekvationssystem med målfunktion). GAMS använder sig av ett antal befintliga kommersiella eller öppna lösare, som användaren själv väljer mellan och kan ställa in efter behag.

I övriga fall har Lars huvudsakligen agerat rådgivande, idéproducerande, tekniskt sakkunnig, samt språkgranskande.

Om särskilda inbjudningar, utvärderingar, rapporter, eller andra underlag efterfrågas kan de skickas separat till den som så önskar.

Referenser

- [1] S. N. Talukdar and R. L. Koo, "The analysis of electrified ground transportation networks," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 96, no. 1, pp. 240–247, 1977.
- [2] A. J. López-López, R. R. Pecharromán, J. A. García-Matos, A. Fernández-Cardador, and A. P. Cucala, "Optimal deployment of energy storage systems in a DC-electrified railway system," in *Computers in Railways XIII*, vol. 127 of *WIT Transactions on The Built Environment*, pp. 603–614, WIT Press, 2012.
- [3] L. Abrahamsson, "Optimal Placement of Energy Storage Systems with Regards to Energy Consumption: A Case Study Applied on a Representative Metropolitan DC Railway for Passenger Traffic," in *2014 Joint Rail Conference*, (Colorado Springs, CO, USA), Apr. 2014. Oral presentation only, DOI: 10.13140/RG.2.1.5190.8644.
- [4] GAMS Development Corporation, Washington, DC, USA, *GAMS — The Solver Manuals*, May 2015. URL: <http://www.gams.com/dd/docs/solvers/allsolvers.pdf>.
- [5] A. J. López-López, L. Abrahamsson, R. R. Pecharromán, A. Fernández-Cardador, P. Cucala, S. Östlund, and L. Söder, "A Variable No-Load Voltage Scheme for Improving Energy Efficiency in DC-Electrified Mass Transit Systems," in *2014 Joint Rail Conference*, no. JRC2014-3818, (Colorado Springs, CO, USA), pp. 1–7, Apr. 2014. DOI: 10.1115/JRC2014-3818.
- [6] A. J. López-López, R. R. Pecharromán, A. Fernández-Cardador, and A. P. Cucala, "Assessment of energy-saving techniques in direct-current-electrified mass transit systems," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 38, pp. 85–100, Jan. 2014. doi:10.1016/j.trc.2013.10.011.
- [7] M. Olofsson and E. Thunberg, "Optimal commitment of frequency converter units for railway power supply," in *Railroad Conference, 1999. Proceedings of the 1999 ASME/IEEE Joint*, 1999.
- [8] L. Abrahamsson and S. Östlund, "Optimizing the power flows in a railway power supply system fed by rotary converters," in *Joint Rail Conference*, no. JRC2015-5798, (San José, CA, USA), IEEE/ASME, Mar. 2015.
- [9] L. Abrahamsson, "Optimal Operation of Railway Power Supply Systems," in *18th Nordic Seminar on Railway Technology*, (Bergen, Norway), Oct. 2014. DOI: 10.13140/RG.2.1.4142.2888.
- [10] L. Abrahamsson, "Railway Power Supply Models and Methods for Longterm Investment Analysis," tech. rep., Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2008. Licentiate Thesis.
- [11] L. Abrahamsson and L. Söder, "An electro-mechanical moving load railway power systems optimization model," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 30, pp. 23–40, May 2013.
- [12] L. Abrahamsson and L. Söder, "Fast Estimation of Relations between Aggregated Train Power System Data and Traffic Performance," *IEEE Journal of Vehicular Technology*, vol. 60, no. 1, pp. 16–29, 2011.

- [13] R. Skogberg, "Railway power supply system models for static calculations in a modular design implementation – Usability illustrated by case-studies of northern Malmbanan," Master's thesis, KTH (Royal Institute of Technology), 2013. XR-EE-ES 2013:006, URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:839614/FULLTEXT01.pdf>.
- [14] L. Abrahamsson, R. Skogberg, S. Östlund, M. Lagos, and L. Söder, "Identifying electrically infeasible traffic scenarios on the Iron Ore line; Applied on the present-day system, converter station outages, and optimal locomotive reactive power strategies," in *Joint Rail Conference*, no. JRC2015-5799, (San José, CA, USA), IEEE/ASME, Mar. 2015.
- [15] A. Stephan, "OpenPowerNet – Simulation of Railway Power Supply Systems," in *WIT Transactions on The Built Environment*, vol. 103, pp. 449–459, Apr. 2008.
- [16] A. Stephan, "Openpowernet - the new co-simulation tool for traction power supply," in *Railway Traction Systems (RTS 2010), IET Conference on*, pp. 1–6, Apr. 2010.
- [17] OpenTrack Railway Technology Ltd., "Railway Simulation." Online, June 2015. URL: <http://www.opentrack.ch/>.
- [18] Y. A. Mahmood, *Availability Analysis of Frequency Converters in Electrified Railway Systems*. PhD thesis, Division of Operation and Maintenance Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, Apr. 2015. URL: http://pure.ltu.se/portal/files/102115520/Yasser_Ahmed_Mahmood.pdf.
- [19] Y. A. Mahmood, L. Abrahamsson, A. Ahmadi, and A. K. Verma, "Reliability evaluation of traction power capacity in converter-fed railway systems," *IET Generation, Transmission and Distribution*, no. ISSN: 1751-8687, 2015. Submitted article.
- [20] Y. Mahmood, A. H. S. Garmabaki, A. Ahmadi, and A. Verma, "Unit-state Reliability Model for Frequency Converters in Electrified Railway," *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2015. Submitted article.
- [21] J. Laury, M. Bollen, L. Abrahamsson, and S. Östlund, "Some benefits of an HVDC feeder solution for railways," in *NORDAC*, (Stockholm, Sweden.), Sept. 2014. URL: http://pure.ltu.se/portal/files/100837555/1_1_John_Laury.pdf, DOI: 10.13140/RG.2.1.3686.4163.
- [22] J. Laury, "OPF for an HVDC Feeder Solution for AC Railways," Master's thesis, Royal Institute of Technology (KTH), 2012. XR-EEE2C 2012:012, URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:565755/fulltext01.pdf>.
- [23] J. Laury, L. Abrahamsson, and S. Östlund, "OPF for an HVDC feeder solution for railway power supply systems," in *WIT Transactions on the Built Environment*, vol. 135, pp. 803–812, WITPress, 2014.
- [24] M. Olofsson, *Optimal Operation of the Swedish Railway Electrical System - An Application of Optimal Power Flow*. PhD thesis, KTH, Stockholm, Sweden, 1996.
- [25] L. Abrahamsson, "Optimization of railway power supply systems – operation and design," in *Presentation held on The Power System Day of the Norwegian Railway Administration*, (Oslo, Norway), 2013. DOI: 10.13140/RG.2.1.3624.1443.

- [26] J. Stern, "TracFeed Simulation, Reference Manual," Tech. Rep. BBSE951112-BNA, Balfour Beatty Rail, 2006.
- [27] J. Stern, "TracFeed Simulation, User's Manual, Swedish Edition," Tech. Rep. BBSE951112-BRA, Balfour Beatty Rail, 2006.
- [28] I. Nordmark, "Comparative simulation and modelling of future railways electric power supplies (original title in Swedish: Jämförande simulering och modellering av framtida järnvägars elenergiförsörjning)," Master's thesis, Uppsala University (UU), June 2009. UPTEC ES09 017, URL: <http://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:461606/FULLTEXT01.pdf>.
- [29] L. Abrahamsson, "Railway, energy efficient traffic (Original title in Swedish: Järnväg, energieffektiv trafikering)," in *The Swedish Transport Administration's R&D Day (Swedish title: Trafikkverkets FoI-dag)*, (Stockholm, Sweden), 2014. DOI: 10.13140/RG.2.1.3093.7122.
- [30] L. Abrahamsson, "Improved railway power supply by the use of converters," in *Presentation made as a visiting researcher at IIT Madrid*, (Madrid, Spain), Oct. 2013. DOI: 10.13140/RG.2.1.4148.4321.
- [31] —, "Welcome to the GAMS Home Page!," Jan. 2015. <http://www.gams.com>.

OPTIMAL DRIFT OCH DIMENSIONERING AV BANMATNINGSSYSTEM

I projektet har modeller för optimal placering av energilagringssystem i tunnelbanenät tagits fram och studerats.

Energilagring möjliggör bättre omhändertagande av bromseffekten vid överspänning, och jämnare effekttillgång vid spänningsfall. I rapporten presenteras dels modeller för optimering av lastdelningen mellan omformarstationer och dels studier av hur tågenergieffektiviseringsberäkningar som görs rent mekaniskt kan anpassas till att i större utsträckning ta elsystemets begränsningar i beaktning.

En variabel tomgångsspänning ökar energieffektiviteten för alla typer av nät, och möjliggör bättre spänningshållning för svagare nät. I rapporten diskuteras en modell för optimal tomgångsspänning för likriktarstationerna i ett tunnelbanenät och resultaten går med extra arbetsinsatser att generalisera för växelströmsbaserade banmatningssystem.

Slutligen har en modell för utvärdering av banmatningens tillförlitlighet med avseende på omriktares och omformares tillgänglighet utvecklats. Modellen möjliggör identifiering av områden som behöver förstärkas, samt områden som redan har tillräcklig mängd installerad effekt ur ett tillgänglighetsperspektiv.

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