

Jämförelse av traktionssystem på Ostlänken

- 15 kV 16 $\frac{2}{3}$ Hz och 25 kV 50 Hz



**LUNDS
UNIVERSITET**

Lunds Tekniska Högskola

**LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Byggteknik - Järnvägsteknik**

Examensarbete:
Ted Persson
Andreas Petersson

© Copyright Ted Persson, Andreas Petersson

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Lunds universitet
Box 882
251 08 Helsingborg

LTH School of Engineering
Lund University
Box 882
SE-251 08 Helsingborg
Sweden

Tryckt i Sverige
Media-Tryck
Biblioteksdirektionen
Lunds universitet
Lund 2014

Sammanfattning

År 2012 beslutade Sveriges regering att landets första höghastighetsbana ska anläggas. Banan benämns Ostlänken och utgör första etappen i ett möjligt höghastighetsnätverk. Den utgör också teknisk standard för det nya nätverket och i samband med projektet bör möjligheten att effektivisera järnvägens tekniska lösningar utvärderas. Traktionssystemet som för närvarande används på svenska järnvägar skiljer sig från det internationellt mer frekvent förekommande. Rapporten syftar till att ge underlag i frågan huruvida anläggning av det internationella systemet vore lämpligt på den specifika banan Ostlänken.

Rapportens resultat är en sammanställning av direkta kostnader för elenergi, anläggning och underhåll med respektive traktionssystem. Jämförelsen utförs dock med särskilt fokus på energieffektivitet, vilken undersökts genom uppbyggnad av simuleringar i Microsoft Excel.

Det internationella traktionssystemet har bättre överföringsegenskaper, men det svenska är trots det energieffektivare på grund av bättre utnyttjande av tågans återmatade energi. Trots det svenska traktionssystemets lägre energikostnad är det internationella systemet något mer ekonomiskt fördelaktigt när hänsyn tas även till anläggnings- och underhållskostnader.

Slutsatsen är att den direkta ekonomiska besparingen av att anlägga det internationella systemet skulle vara cirka 40 MSEK över Ostlänkens 60 år långa livslängd. Skillnaden är i sammanhanget marginell, vilket tillsammans med osäkerhet i kalkylerna och beaktande av exempelvis administrativa kostnader vid införande av nytt system leder till rekommendationen att inte anlägga det internationella systemet på Ostlänken.

Nyckelord:

Höghastighetsjärnväg

Ostlänken

Traktionssystem

15 kV 16 $\frac{2}{3}$ Hz

25 kV 50 Hz

Energieffektivitet

Abstract

In 2012 the Swedish government decided that Sweden's first high speed rail shall be constructed. The railway is titled Ostlänken and forms a part of a potential high speed rail network. It also sets the technical standard for the new network, and therefore the possibility to improve technical solutions should be evaluated. The Swedish power supply system currently in use differs from the internationally more common system. This study aims to give partial insight regarding whether construction of the international traction power supply system on the specific high speed rail Ostlänken is to prefer.

The results contain a summary of direct costs for electric energy, construction and maintenance for both traction power supply systems. The comparison has a special focus towards energy efficiency which has been studied by setting up simulations in Microsoft Excel.

The internationally common system is more efficient regarding transmission, although the Swedish system overall is more energy efficient since it utilizes energy regenerated from braking rolling stock to a greater extent. Even though the Swedish system is cheaper regarding energy efficiency, the international system is slightly more economically beneficial when considering construction and maintenance costs as well.

In conclusion, the direct economic benefit of building the international traction power supply system rather than the Swedish on Ostlänken is 40 MSEK over the railways lifespan of 60 years. The difference is in context marginal which along with uncertainty in calculations and regard to administrative cost of implementing a new system in Sweden leads to the recommendation of not using the international traction power supply system on Ostlänken.

Keywords:

High speed rail, HSR

Ostlänken

Traction power supply system

15 kV 16 $\frac{2}{3}$ Hz

25 kV 50 Hz

Energy efficiency

Förord

Examensarbetet som denna rapport utgör är sista ledet i utbildningen till högskoleingenjörer inom byggt teknik – järnvägsteknik vid Lunds Tekniska Högskola.

Vi vill tacka Sven Assarsson på Rejlers Ingenjörer AB för ämnesförslag och stor hjälp genom sin handledarroll. Vidare tackar vi Christer Lindgren på Järnvägsskolan i Ängelholm för hans delgivande av teknisk expertis och handledning.

Tack även till Martin Stridsberg, gruppchef på Rejlers, för möjligheten att skriva examensarbetet på Rejlers kontor i Malmö. Möjligheten har medfört en trevlig period i omgivning av erfarna konsulter.

Tack till Anders Wretstrand på institutionen Väg och trafik, LTH, för hans roll som examinator.

Utöver detta har arbetet medfört kontakt med flera yrkesverksamma personer via e-post, både på Trafikverket och flera olika konsultföretag, svenska såväl som internationella. Tack till alla er som varit villiga att hjälpa till genom utförliga och trevliga svar.

Ted Persson & Andreas Petersson

Innehållsförteckning

| | |
|--|-----------|
| 1 Inledning | 1 |
| 2 Beskrivning av ostlänkenprojektet | 3 |
| 2.1 Varför ska Ostlänken byggas? | 4 |
| 3 Introduktion till traktionssystemen | 7 |
| 3.1 15 kV-systemet | 7 |
| 3.1.1 Roterande omformare | 8 |
| 3.1.2 Statiska omriktare..... | 9 |
| 3.1.2.1 Direktomriktare..... | 9 |
| 3.1.2.2 Mellandledsomriktare | 10 |
| 3.2 25 kV-systemet | 11 |
| 3.2.1 Alternativ extrautrustning på transformatorstationen..... | 13 |
| 3.2.2 Anslutning till bana med 15 kV-system | 14 |
| 3.3 AT - system | 14 |
| 4 Dimensionerande förutsättningar | 17 |
| 4.1 Trafikeringsmängd..... | 17 |
| 4.2 Fordonsegenskaper..... | 17 |
| 4.3 Redundans | 17 |
| 5 Dimensionering | 19 |
| 5.1 15 kV-system..... | 19 |
| 5.2 25 kV-system..... | 20 |
| 5.3 Överdimensionering | 21 |
| 6 Överföringsförluster | 23 |
| 6.1 Systemjämförelse med lika förutsättningar | 23 |
| 6.1.1 Metod vid energiförlustberäkningar | 24 |
| 6.1.1.1 Beräkna systemets impedans | 24 |
| 6.1.1.2 Beräkning av spänningsfall | 28 |
| 6.1.1.3 Beräkning av ström | 29 |
| 6.1.1.4 Beräkning av energiförluster | 29 |
| 6.2 Systemjämförelse vid förutsättningar rimliga på Ostlänken | 32 |
| 6.2.1 Förutsättningar och resonemang..... | 32 |
| 6.2.2 Beräkningsresultat..... | 33 |
| 6.3 Jämförelse av energiförluster | 38 |
| 7 Återmatande broms | 39 |
| 7.1 Återmatning i 15 kV-systemet..... | 39 |
| 7.2 Återmatning i 25 kV-systemet..... | 40 |
| 7.3 Återmatning till trefasnät..... | 40 |
| 7.4 Sammanställning av återmatningspotential | 41 |
| 8 Ekonomisk jämförelse | 43 |
| 8.1 Energieffektivitet..... | 43 |

| | |
|---------------------------------------|-----------|
| 8.2 Anläggningskostnader | 43 |
| 8.2.1 15 kV-systemet | 43 |
| 8.2.2 25 kV-systemet | 44 |
| 8.3 Underhållskostnader | 46 |
| 8.4 Kostnadssummering | 46 |
| 9 Diskussion | 49 |
| 10 Slutsats | 51 |
| 10.1 Framtida studier | 51 |
| 11 Källförteckning | 53 |

Figurförteckning

| | |
|--|----|
| Figur 1: Ostlänkens korridor | 3 |
| Figur 2: Sveriges potentiella höghastighetsnät. Röd sträckning illustrerar Ostlänken | 4 |
| Figur 3: Samtliga korridorer inom TEN-T | 5 |
| Figur 4: Princip vid inkoppling av traktionsnät mot trefasnät. | 7 |
| Figur 5: Avskalad roterande omformare med 4-polig generator till vänster och 12-polig motor till höger. | 8 |
| Figur 6: Direktomriktarens uppbyggnad | 10 |
| Figur 7: Principen för sammansättning av frekvensjusterad spänning | 10 |
| Figur 8: Mellanledsomriktarens uppbyggnad | 11 |
| Figur 9: Typisk uppbyggnad av traktionsnätet vid 25 kV-systemet | 12 |
| Figur 10: Möjlig redundanslösning i 25 kV-systemet..... | 13 |
| Figur 11: AT-systemets uppbyggnad | 15 |
| Figur 12: Karta över omformarstationer i Ostlänkens närområde | 20 |
| Figur 13: Principskiss över möjlig placering av transformatorstationer..... | 21 |
| Figur 14: Principskiss över elmatningsstationernas placering..... | 23 |
| Figur 15: De olika delsträckorna vid impedansberäkning i 15 kV-systemet...25 | |
| Figur 16: De olika delsträckorna vid impedansberäkning i 25 kV-systemet...26 | |
| Figur 17: Resistans med 15 kV- respektive 25 kV-system. | 27 |
| Figur 18: Reaktans med 15 kV- respektive 25 kV-system. | 27 |
| Figur 19: Spänningsfall med 15 kV- respektive 25 kV-system. | 29 |
| Figur 20: Momentan effektförlust med 15 kV- respektive 25 kV-system..... | 30 |
| Figur 21: Energiförlust vid överföring med 15 kV- respektive 25 kV-system | 31 |
| Figur 22: Energiförlust med 15 kV- respektive 25 kV-system. | 32 |
| Figur 23: Principskiss över elmatningsstationernas placering..... | 33 |
| Figur 24: Resistans med 15 kV- respektive 25 kV-system. | 34 |
| Figur 25: Reaktans med 15 kV- respektive 25 kV-system. | 34 |
| Figur 26: Spänningsfall med 15 kV- respektive 25 kV-system. | 35 |
| Figur 27: Momentan effektförlust med 15 kV- respektive 25 kV-system..... | 35 |
| Figur 28: Betydelsen av elmatningsstationernas placering för momentan effektförlust med 15 kV- respektive 25 kV system. | 36 |

| | |
|---|----|
| Figur 29: Energiförlust vid överföring med 15 kV- respektive 25 kV-system | 37 |
| Figur 30: Energiförlust med 15 kV- respektive 25 kV-system. | 37 |
| Figur 31: Besparingen i proportion till kostnader..... | 47 |

Tabellförteckning

| | |
|---|----|
| Tabell 1: Tågdata för Siemens Velaro e320 | 19 |
| Tabell 2: Impedans vid 15 kV- respektive 25 kV-system. | 25 |
| Tabell 3: Jämförelse av energiförluster mellan traktionssystemen, per tåγκörning. | 38 |
| Tabell 4: Sammanställning av återmatning per tåγκörning..... | 41 |
| Tabell 5: Ekonomisk översikt inom energieffektivitet, över livslängd. | 43 |
| Tabell 6: Budget för projekt Förstärkt kraftförsörjning..... | 44 |
| Tabell 7: Anläggningskostnader för 15 kV-systemet. | 44 |
| Tabell 8: Anläggningskostnader för 25 kV-systemet. | 45 |
| Tabell 9: Underhållskostnader för elmatningsstationerna. | 46 |
| Tabell 10: Sammanfattning av kostnader för respektive traktionssystem. | 47 |

Begreppsförklaring

| | |
|--------------------|---|
| 15 kV-system | Traktionssystem med 15 kV spänning och 16 2/3 Hz frekvens. Utnyttjar dubbelmatning. |
| 25 kV-system | Traktionssystem med 25 kV spänning och 50 Hz frekvens. Utnyttjar enkelmatning. |
| AT | Autotransformator. Transformator med en lindning och tre uttag, som möjliggör elenergitransport över längre avstånd i traktionsnätet. |
| AT-fönster | Utrymmet mellan två på varandra följande autotransformatorer i ett överföringssystem. |
| AT-system | Traktionssystem där autotransformatorer nyttjas. |
| Dubbelmatning | Spårfordon får el från två elmatningsstationer samtidigt, belägna på respektive sida om fordonet. |
| Elmatningsstation | Överför el från trefasnätet till järnvägens överföringssystem. Innefattar både omformarstation och transformatorstation. |
| Enkelmatning | Spårfordon får el från endast en elmatningsstation. |
| Inmatningspunkt | De punkter i överföringssystemet där en autotransformator är ansluten. |
| Sektioneringspunkt | Punkt som i 25 kV-systemet elektriskt separerar efterföljande sektioner av överföringssystemet. |
| STH | Största tillåtna hastighet för trafikerande tåg. |
| Traktionsnät | Järnvägens elnät som förser tåg med drivström. Inkluderar elmatningsstationer och överföringssystem. |
| Traktionssystem | Uppbyggnadsprincip av traktionsnätet. Exempel på traktionssystem är 15- och 25 kV-system. |
| Trefasnät | Stamnät och regionala elnät som förser traktionsnätet med el. |
| TSD | Tekniska specifikationer för driftskompatibilitet. Riktlinjer för att bland annat underlätta gränsöverskridande trafik inom EU. |
| X-koppling | Parallellkoppling av spåren i en flerspårsanläggning. |
| Överföringssystem | Den del av traktionsnätet som möjliggör transport av elenergi till tågen, bland annat ledningar och autotransformatorer. |

1 Inledning

Hösten 2012 beslutade regeringen att landets första höghastighetsjärnväg, Ostlänken, ska anläggas. Banan utgör första etappen i ett möjligt höghastighetsnätverk (Näringsdepartementet, 2012). Ostlänkenprojektet kommer att utgöra standarden för det nya nätverket och i samband med det bör möjligheten att effektivisera järnvägens traktionssystem utvärderas. I Sverige används 15 kV 16 $\frac{2}{3}$ Hz, medan många höghastighetsbanor internationellt använder 25 kV 50 Hz. Exempel på länder som använder det sistnämnda är Frankrike, Storbritannien, Italien, Spanien, Ryssland, Kina och Japan (Büker, 2007); (Oura, Mochinaga, & Nagasawa, 1998).

Rapporten syftar till att sammanställa information om respektive traktionssystem uppbyggnad för att sedan göra en komparativ framställning av dess fördelar och nackdelar inom främst energieffektivitet. Målet är att ge underlag i frågan huruvida elektrifiering med 25 kV 50 Hz vore lämpligt på Sveriges kommande höghastighetsbana. Frågeställningar som ligger till grund för att uppnå målet är:

- Hur är respektive traktionssystem uppbyggt?
- Hur skiljer sig de långsiktiga kostnaderna för energiförluster i respektive systems traktionsnät?
- Hur fungerar återmatning och kan det utnyttjas mer eller mindre beroende på traktionssystem?
- Hur skiljer sig anläggningskostnader mellan respektive traktionssystem?
- Hur skiljer sig den långsiktiga kostnaden med hänsyn till underhåll av elmatningsstationerna?

Huvudsakligt använda arbetsmetoder för att besvara frågeställningarna är litteraturstudier, simuleringar i Microsoft Excel och kontakt med yrkesverksamma personer via e-post.

Rapporten avgränsas till att utreda om 25 kV 50 Hz är ett ekonomiskt fördelaktigt alternativ för Ostlänken. Hänsyn tas således inte till huruvida det skulle vara fördelaktigt att ersätta befintliga 15 kV 16 $\frac{2}{3}$ Hz anläggningar. Vidare utreds inga indirekta kostnader genom samhällsekonomisk analys. Fokus ligger på direkta ekonomiska effekter inom energieffektivitet, anläggning och underhåll.

2 Beskrivning av ostlänkenprojektet

Enligt (Trafikverket, 2012) kommer Ostlänken bli ”Sveriges största samhällsutvecklingsprojekt och Sveriges första höghastighetsjärnväg”. Projektet innebär anläggning av 15 mil höghastighetsjärnväg med dubbelspår mellan Järna och Linköping, anpassad för STH 320 km/h. Banan beräknas kosta cirka 30 miljarder kronor och byggstart bedöms till tidigast år 2017. Ostlänken bedöms vara färdigställd senast år 2028 (Trafikverket, I). Fastställd korridor framgår av figur 1.



Figur 1: Ostlänkens korridor. Bearbetad efter (Nyköping kommun, 2013).

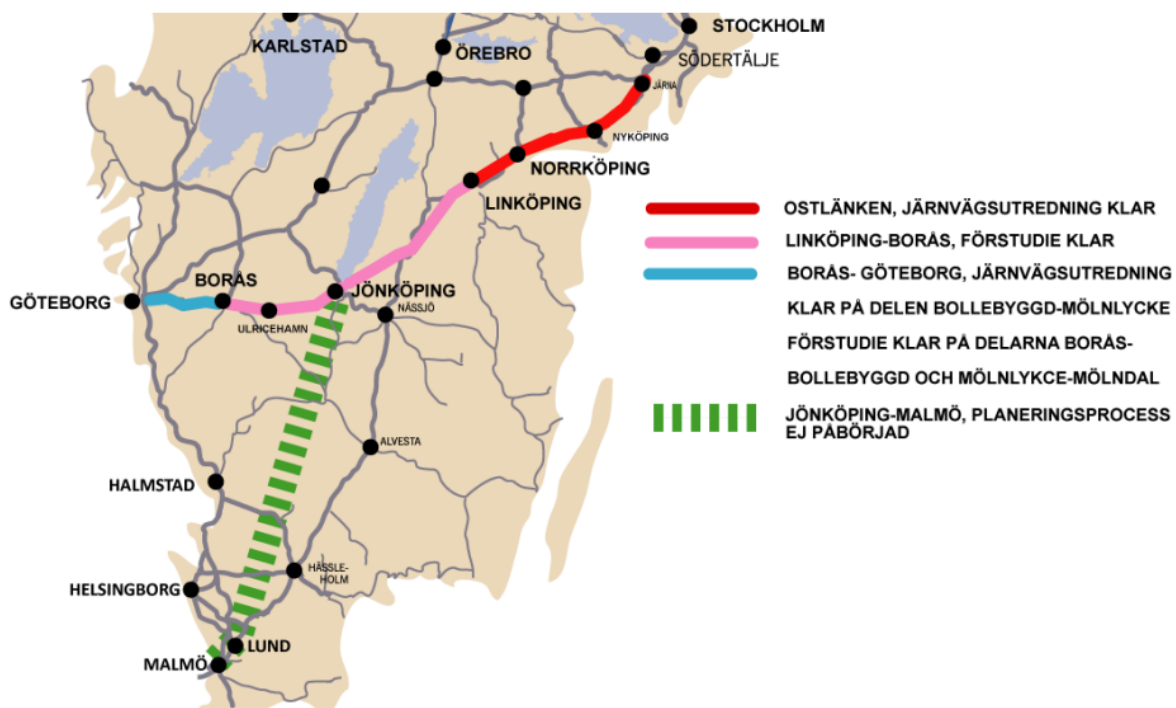
2.1 Varför ska Ostlänken byggas?

Trafikverket ser många positiva effekter med Ostlänken. Nedan sammanställs några av dem:

- Restider kan reduceras mellan berörda storstadsregioner.
- Genom överflyttning av persontrafik till Ostlänken frigörs kapacitet på Västra- och Södra stambanan. Den frigjorda kapaciteten kan utnyttjas till att öka godstransporterna på järnväg.
- Långsiktiga miljövinster erhålls till följd av större andel transport på järnväg, istället för med andra mindre miljövänliga transportslag.
- En ytterligare järnvägsanläggning parallellt med nuvarande stambanor gör tågtrafiken i området mer driftsäker genom ökade möjligheter till trafikomledning.
- Bättre möjligheter till arbetspendling medför regionförstoring.

(Trafikverket, 2012).

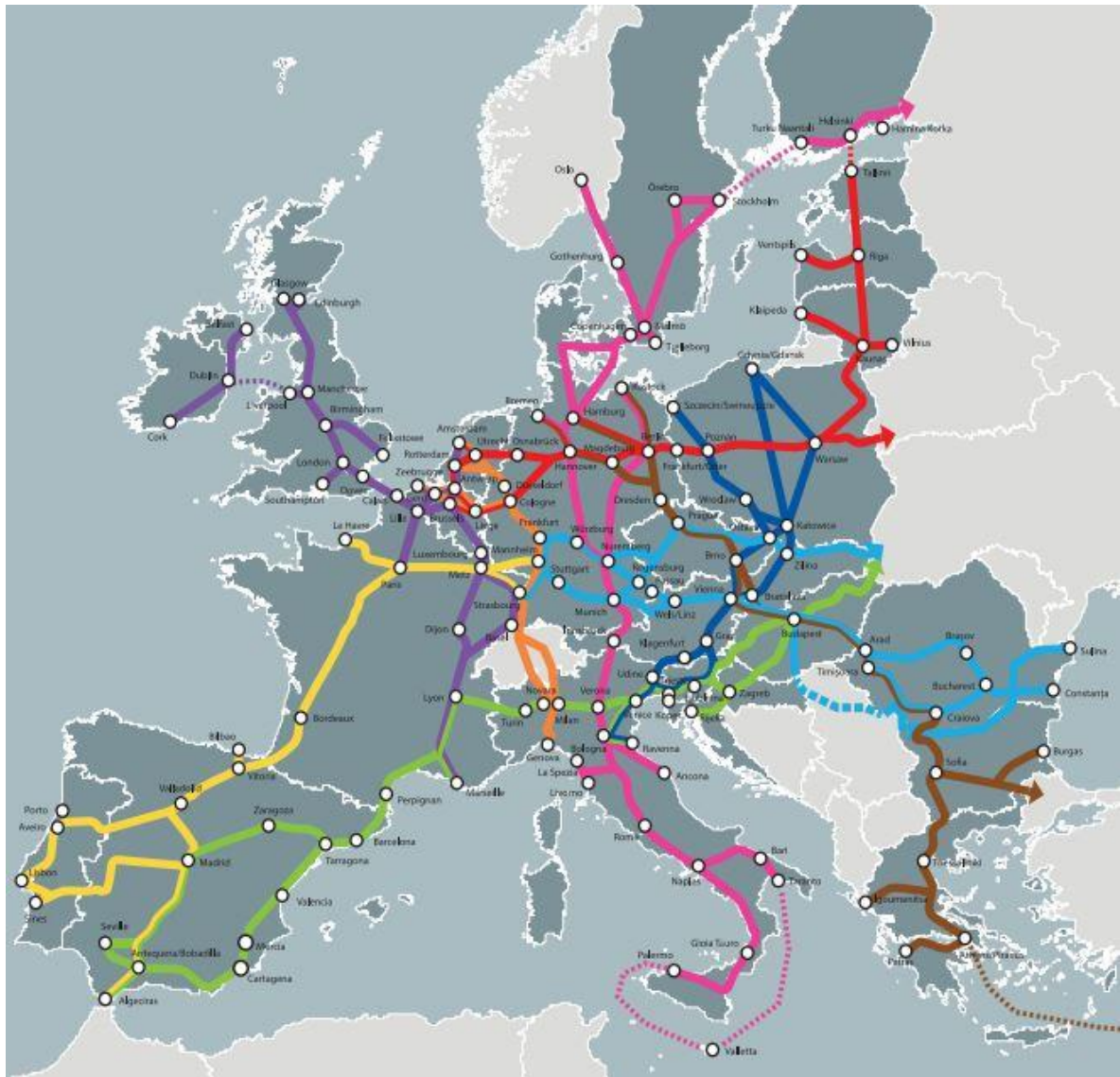
Vidare utgör Ostlänken det första steget i planerna om byggnation av ett höghastighetsnät i Sverige (Näringsdepartementet, 2012). Se figur 2 för schematisk skiss över det potentiella höghastighetsnätet och respektive etapps utredningsstadium.



Figur 2: Sveriges potentiella höghastighetsnät. Röd sträckning illustrerar Ostlänken (Trafikverket, 2014a, s. 36).

I ett ytterligare större perspektiv kommer Ostlänken utgöra en del av det transeuropeiska järnvägsnätet, TEN-T. TEN-T innefattar nio korridorer som ska förbättra gränsöverskridande anslutningar inom Europa. En av

korridorerna är "Skandinavien - Medelhavet" där Ostlänken utgör en del av sträckan (Europeiska kommissionen, 2014). Se rosa sträckning i figur 3.



Figur 3: Samtliga korridorer inom TEN-T (Europeiska kommissionen, 2013).

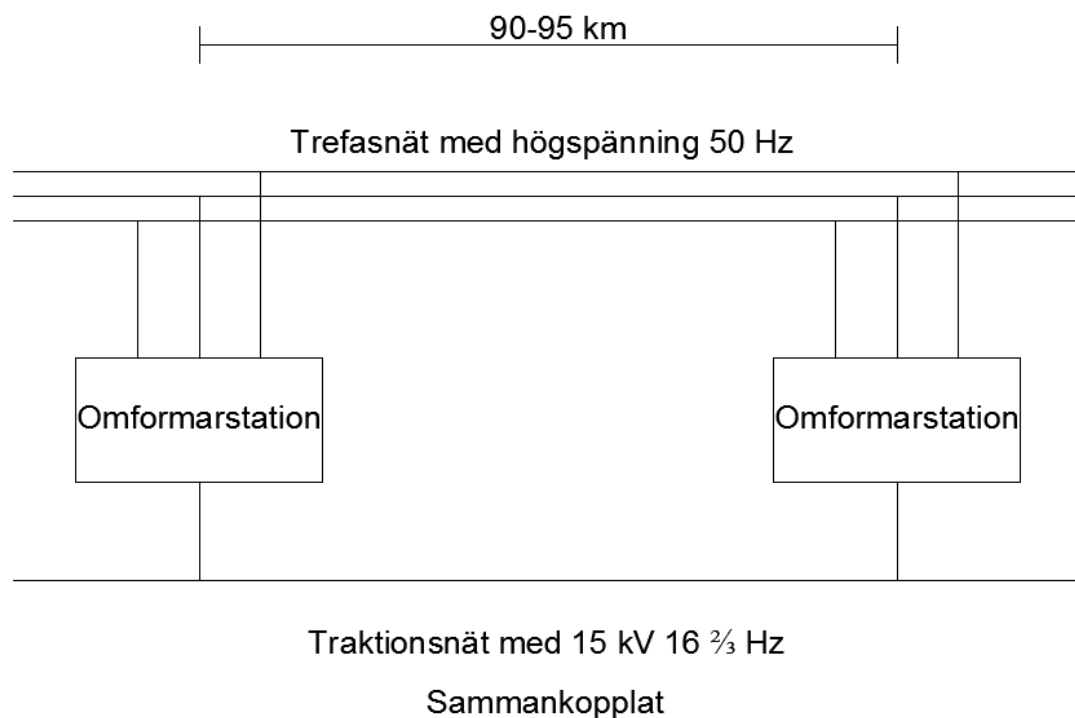
3 Introduktion till traktionssystemen

I rapporten utreds två alternativa traktionssystem för Ostlänken. Alternativ ett är Sveriges nuvarande system med spänning 15 kV och frekvens $16 \frac{2}{3}$ Hz. Alternativ två är ett internationellt mer frekvent förekommande system med spänning 25 kV och frekvens 50 Hz. Trafikverket har fastställt en rad systemkrav för Ostlänken där de bland annat fastslår att AT-system ska användas (Trafikverket, 2013a). Därför utgår jämförelsen ifrån att AT-system används oavsett traktionssystem.

3.1 15 kV-systemet

Trefasnätets spänning har frekvensen 50 Hz. I järnvägens överföringssystem används spänning med frekvens minskad till en tredjedel, det vill säga $16 \frac{2}{3}$ Hz. Att så är fallet beror på de tekniska svårigheter som fanns med att driva äldre spårfordons kommutatormotorer med högre frekvenser.

Frekvensskillnaden medför att el från trefasnätet som ska användas till traktion på järnvägen måste frekvensjusteras. Justeringen sker med roterande omformare (se kapitel 3.1.1) eller statiska omriktare (se kapitel 3.1.2). Dessa är placerade i omformarstationer som vanligtvis placeras med inbördes avstånd om 90-95 km utmed traktionsnätet. I omformarstationer anpassas även spänningen innan elenergin skickas ut till överföringssystemet (Östlund, 2012). Figur 4 presenterar gränssnittet mellan trefasnät och traktionsnät.



Figur 4: Princip vid inkoppling av traktionsnät mot trefasnät.

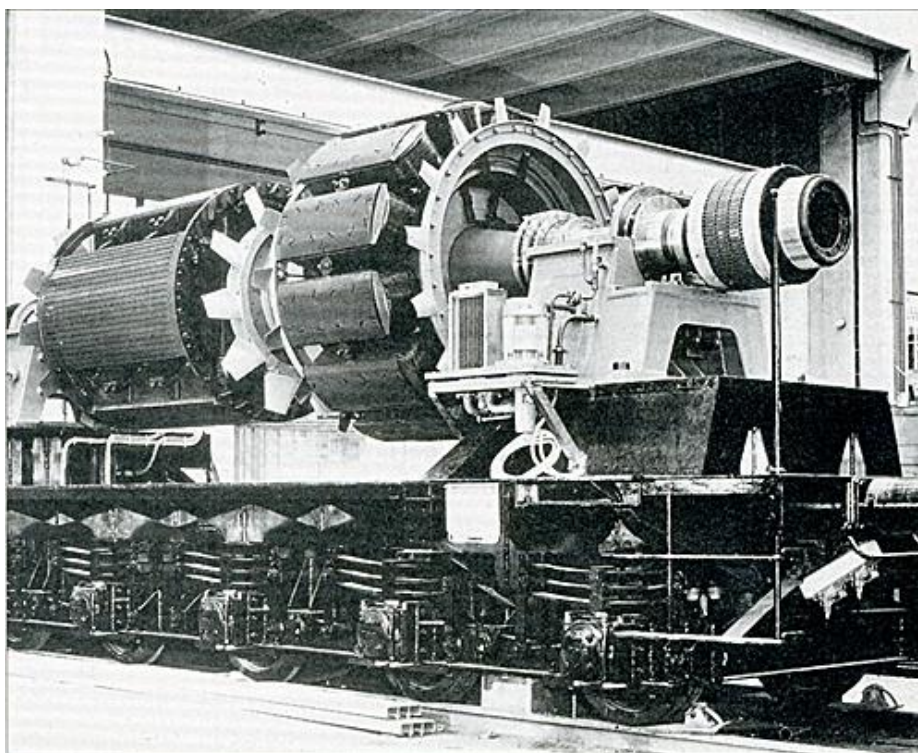
Inkopplingsprincipen leder till att hela traktionsnätet är sammankopplat. Därför får tåg som befinner sig mellan två omformarstationer drivström från

båda omformarstationer simultant genom dubbelmatning (Godske, 2013). Andelen drivström från respektive omformarstation ökar med minskat avstånd till tåget och vice versa.

15 kV-systemet har redundans i flera nivåer. I en omformarstation finns ofta flertalet omformare eller omriktare. Det innebär att vid bortfall av en kan effekten ändå levereras från de övriga. Om en omformarstation inte kan leverera tillräcklig effekt dras mer effekt till tåget från närmaste efterföljande omformarstation, eftersom hela traktionsnätet är elektriskt sammanbundet.

3.1.1 Roterande omformare

Roterande omformare är uppbyggda av en tolvpolig elmotor som matas med 6,3 kV trefas 50 Hz el. Eftersom spänningen i trefasnätet har högre spänningsnivå måste den först transformeras ner. Elmotorns axel driver runt en fyrpolig enfasgenerator som ger utgående el med frekvensen reducerad till en tredjedel. Frekvensreduceringen sker eftersom generatorns poltal är en tredjedel av motorns, se figur 5. Därefter transformeras spänningen upp till 15 kV och matas ut på traktionsnätet (Östlund, 2012).



Figur 5: Avskalad roterande omformare med 4-polig generator till vänster och 12-polig motor till höger (Städje, 2009).

Fördelar med roterande omformare gentemot statiska omriktare (som beskrivs i kapitel 3.1.2) är att de kan överbelastas under relativt lång tid (Biedermann, 2002). De drivs av en trefasmotor vilket gör att lasten på trefasnätet alltid blir symmetrisk. Trefasmotorn är en synkronmotor och kan generera reaktiv effekt när trafikerande tåg konsumerar reaktiv effekt. Genom att reglera

magnetiseringsströmmen som påverkar den reaktiva effekten, kan utmatad spänning till kontaktledning hållas konstant. Den roterande omformaren skiljer traktionsnätet och trefasnätet från varandra vilket gör att störningar på ett nät inte överförs till det andra (Östlund, 2012). Dessutom kan alla roterande omformare återmata el till trefasnätet (Biedermann, 2002).

Nackdelar med roterande omformare gentemot statiska omriktare är att de vid uppstart måste fhasas in på traktionsnätet samt den relativt långa starttiden om cirka två minuter. Dessutom har omformare verkningsgrad på 85-90 %, vilket är mindre effektivt än omriktare. Det beror främst på att verkningsgraden är låg vid låg belastning (Östlund, 2012).

Det finns åtgärder som förbättrar de roterande omformarnas verkningsgrad. Här innefattas bland annat datorprogram som räknar ut hur mycket effekt som krävs och när de olika omformarna lämpligen ska startas och stoppas för att undvika låg belastning (Biedermann, 2002). Dessutom kan generatorstatorns lindning lindas om så att omformaren direkt ger nominell spänning. Då blir utmatningstransformatorn överflödigt. Med dessa åtgärder kan verkningsgraden ökas till cirka 94 %.¹

3.1.2 Statiska omriktare

Även statiska omriktare drivs av el från trefasnätet. Frekvensjusteringen sker med hjälp av kraftelektronik istället för motor och generator. Det finns två kategorier av statiska omriktare, direktomriktare och mellanledsomriktare. En fördel hos båda är att det mekaniska steget med roterande omformare uteblir, vilket leder till högre verkningsgrad samt kortare uppstartstid (Östlund, 2012).

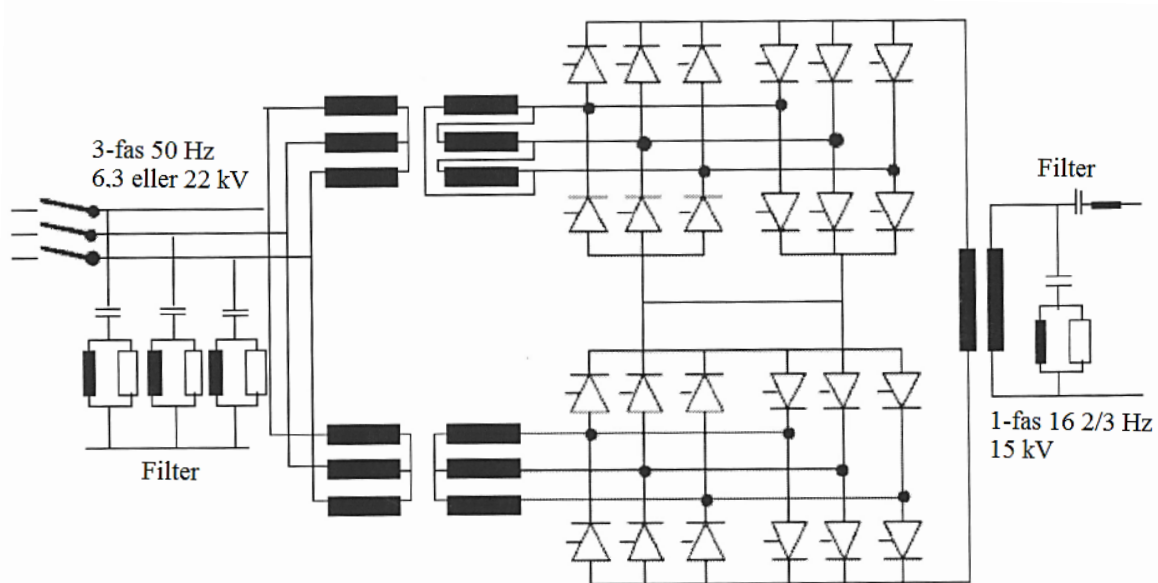
Vid nybyggnation av frekvensjusterande utrustning byggs idag endast statiska omriktare. Dock används och underhålls de befintliga roterande omformarna fortfarande (Trafikverket, 2013b).

3.1.2.1 Direktomriktare

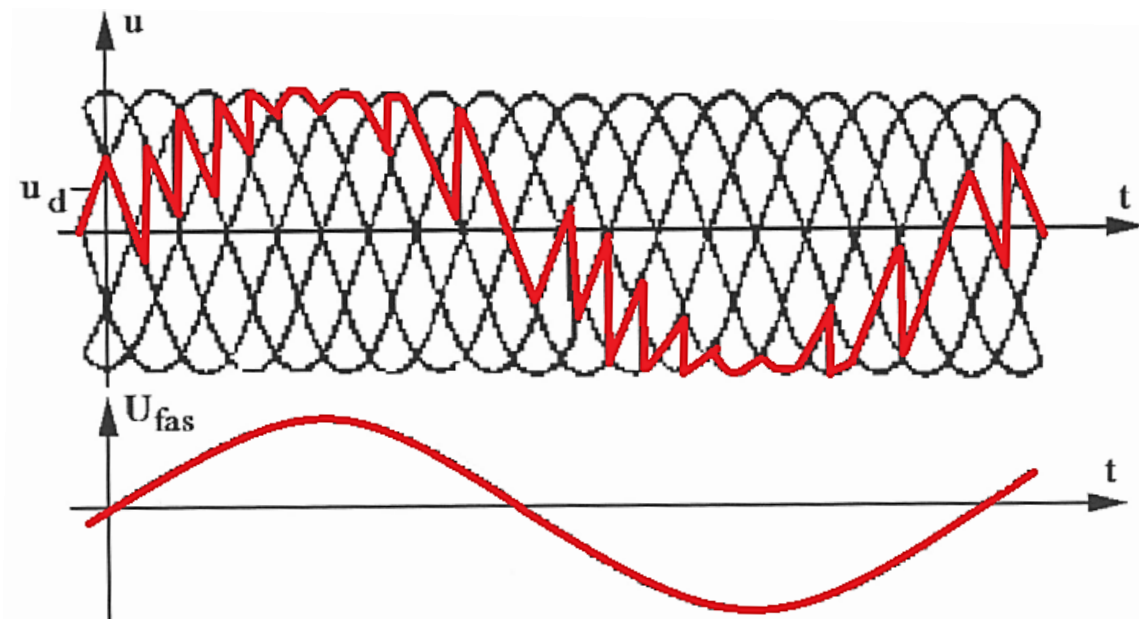
Direktomriktare är uppbyggda av två seriekopplade strömriktare bestående av en 12-pulsbrygga vardera. Omriktaren matas med spänningsnivå 6,3 eller 22 kV (beroende på modell) och frekvensen 50 Hz. Ingångstransformatorn har två sekundärlindningar, där den ena är Y-kopplad och den andra är D-kopplad, se figur 6. Därför är spänningen i 12-pulsbryggorna 30° fasförskjutna, vilket tillsammans med tyristorer i 12-pulsbryggorna ger åtskilliga något fasförskjutna 50 Hz sinuskurvor. Från dessa skapas en 16 2/3 Hz sinuskurva, enligt figur 7. Den frekvensjusterade sinuskurvan transformeras upp till spänningen 15 kV, och passerar filter på sekundärsidan som motverkar att övertoner från direktomriktaren kommer ut i överföringssystemet. Filter installeras även på ingångstransformatorns primärsida för att minska

¹ Muntlig källa: Christer Lindgren, Järnvägsskolan, Trafikverket.

störningar på trefasnätet och producera reaktiv effekt som kompensation för den reaktiva effekt omriktaren konsumerar. Då hålls effektfaktorn närmre ett vilket gör omriktaren mer energieffektiv (Östlund, 2012).



Figur 6: Direktomriktarens uppbyggnad. Bearbetad efter (Östlund, 2012, s. 178).



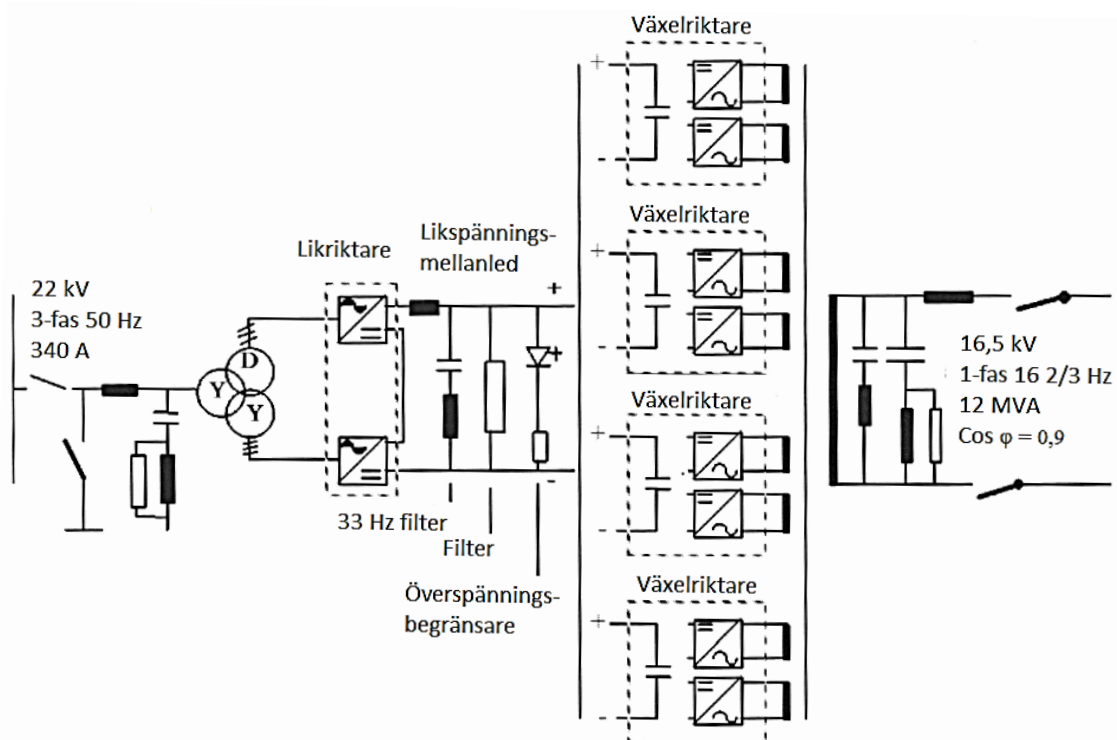
Figur 7: Principen för sammansättning av frekvensjusterad spänning. Bearbetad efter (Östlund, 2012, s. 178).

Fördelar med direktomriktare är lägre inköps-, underhålls- och installationskostnader gentemot roterande omformare. Precis som omformare kan direktomriktare återmata effekt till trefasnätet från tåg med regenerativ broms (Östlund, 2012).

3.1.2.2 Mellandledsomriktare

Mellandledsomriktare matas med spänningsnivå 22 kV och frekvens 50 Hz. De är i likhet med direktomriktare uppbyggda av en ingångstransformator med Y-

respektive D-kopplade sekundärlindningar. Därefter likriktas spänningen och filtreras innan den växelriktas igen. Växelriktarna bildar en $16 \frac{2}{3}$ Hz sinuskurva från likspänningen. En växelriktare klarar bara av en viss effekt och därför parallellkopplas flera växelriktare. De är kopplade till en enfas $16 \frac{2}{3}$ Hz transformator som transformerar upp spänningen till 15 kV innan utmatning till överföringssystemet sker (Östlund, 2012). Se figur 8 för en schematisk bild över mellanledsomriktaren.



Figur 8: Mellanledsomriktarens uppbyggnad. Bearbetad efter (Östlund, 2012, s. 180).

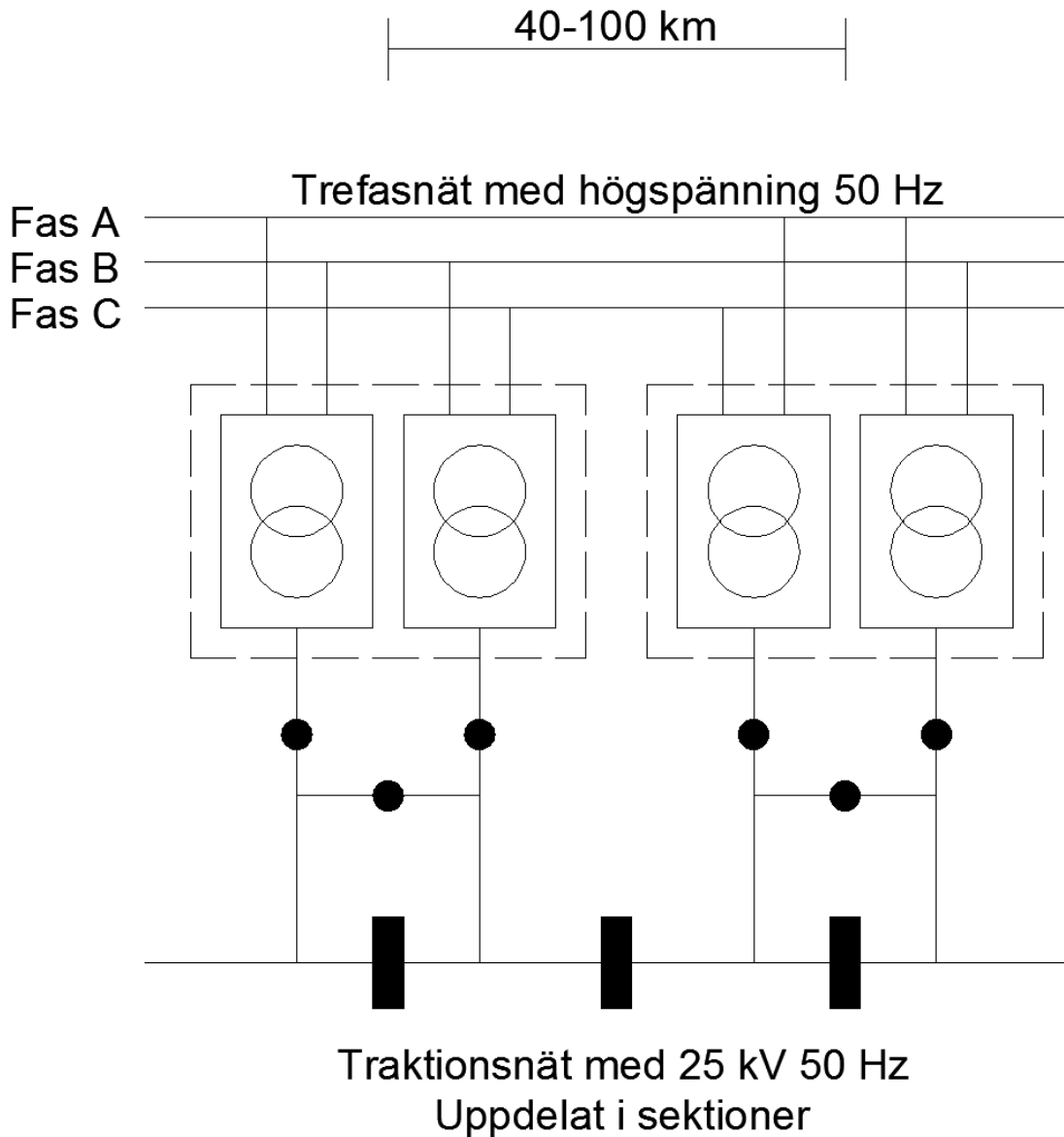
Fördelar med mellanledsomriktaren jämfört med direktomriktaren är att den reaktiva effektförbrukningen är mindre (Östlund, 2012). Dock kan inte alla mellanledsomriktare återmata till trefasnätet, utan endast modellen TGTO.²

3.2 25 kV-systemet

Eftersom frekvensen i överföringssystemet matchar den i trefasnätet krävs ingen frekvensjustering och energiförluster i det steget uteblir. Istället kopplas transformatorer placerade i transformatorstationer direkt mellan två faser i trefasnätet och transformerar ner spänningen vilket gör belastningen på trefasnätet osymmetrisk (Östlund, 2012). För att minimera påverkan varieras inkopplingsfaserna. Vid varje på varandra följande transformator bör alltså inkoppling ske mellan fas A och B, följt av fas B och C, följt av fas C och A. Nackdelen med nämnd inkopplingsstrategi är att järnvägens elnät delas upp i

² Ibid.

sektioner, vilka elektrifieras av olika faser. Om sektionerna får kontakt med varandra kortsluts faserna i trefasnätet. Med hjälp av sektioneringspunkter hindras angränsande sektioner att få kontakt med varandra. Därför är inte dubbelmatning möjlig och trafikerande tåg kraftförsörjs av endast en transformator (Delcan-Arup Joint Venture, 2010). Figur 9 illustrerar typisk uppbyggnad av 25 kV-systemet.

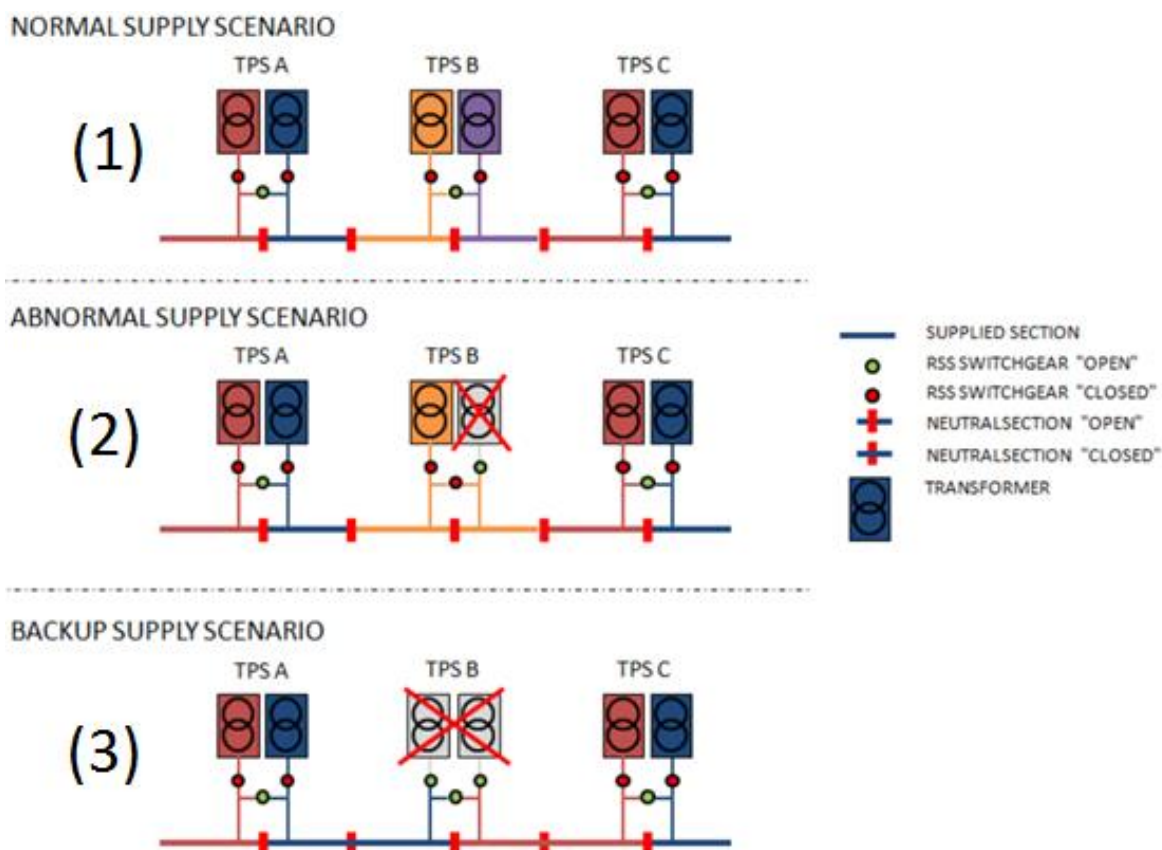


Figur 9: Typisk uppbyggnad av traktionsnätet vid 25 kV-systemet. Bearbetad efter (Delcan-Arup Joint Venture, 2010, s. 4).

Trots att efterföljande sektioner på järnvägen i 25 kV-systemet elektrifieras av olika faser kan redundansen lösas på motsvarande sätt som i 15 kV-systemet. Om en transformator utsätts för driftstopp kan en annan i samma transformatorstation överta matningen, enligt scenario två i figur 10. Om en hel transformatorstation skulle utsättas för driftstopp kan anslutningen till elnätet brytas samtidigt som sektionisoleratorer överbryggas. Sträckan matas då från närliggande transformatorstationer enligt scenario tre i figur 10. Tågdrift

blir då möjlig även i scenario två och tre, förutsatt att effekten från transformatorerna i drift räcker till.

Trots hög driftsäkerhet dimensioneras kraftförsörjningen efter scenario två och tre. För att klara redundansen enligt ovan beskriven princip bör inte en transformator i normalfallet vara belastad mer än 50 % av sin installerade effekt (Copenhagen - Ringsted Team, 2013).



Figur 10: Möjlig redundanslösning i 25 kV-systemet. Bearbetad efter (Copenhagen - Ringsted Team, 2013, s. 15).

En alternativ metod att erhålla redundans är att utrusta varje transformatorstation med en reservtransformator. Vid driftstörning alternativt underhållsarbete på en transformator kopplas reservtransformatorn in, och normal tågdrift kan upprätthållas (Goossens, 2010).

3.2.1 Alternativ extrautrustning på transformatorstationen

SVC:er (Static VAR Compensators) är extrautrustning som i olika utföranden kan fylla flera funktioner. För att avgöra om SVC:er är nödvändiga bör traktionsnätets påverkan på trefasnätet utvärderas, gällande till exempel assymetri, övertoner och effektfaktor (Delcan-Arup Joint Venture, 2010).

En funktion är att upprätthålla effektfaktorn nära ett genom att producera reaktiv effekt motsvarande den som tåg på traktionsnätet konsumerar. Om en transformator längs linjen utsätts för driftstörning bidrar SVC:erna till att upprätthålla en god spänningsnivå över en längre sträcka och ger således en

viss redundans till systemet. Utöver dessa funktioner fungerar den ständigt som filter för att få en jämn sinuskurva.

SVC:er kan också installeras i direkt anslutning till trefasnätet nära transformatorstationer för att minimera asymmetrin på trefasnätet. Exempelvis används en sådan anläggning vid höghastighetslinjen mellan London och Dover, där obalansen mellan de två faser som ansluts till transformatorstationen reducerats från 2 % till 0,1 % (ABB, 2010).

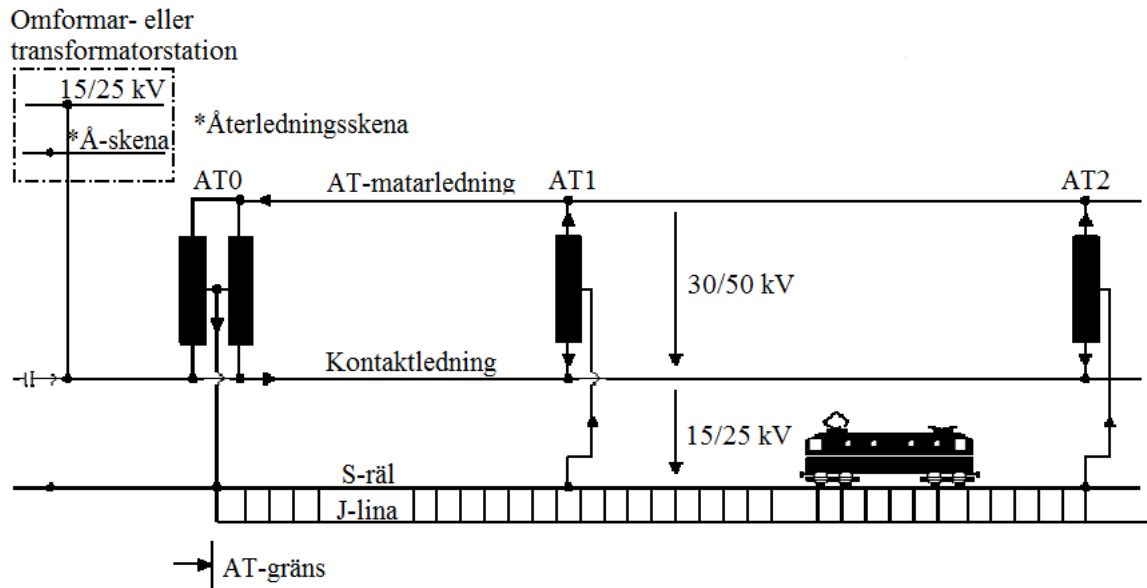
3.2.2 Anslutning till bana med 15 kV-system

Ostlänken ska anslutas till det befintliga järnvägsnätet. Planerade kopplingspunkter är i Järna, Norrköping och Linköping (Banverket, 2009b). Om 25 kV-system används måste befintliga banor skiljas elektriskt från Ostlänken, vilket görs med neutralsektioner. På grund av rådande omständigheter med skiljande traktionssystem i Sverige respektive Danmark finns redan en neutralsektion i Sverige, vilken separerar Sveriges 15 kV-system och Danmarks 25 kV-system från varandra. Anläggningen når inte upp till de krav som ställs på neutralsektioner enligt TSD Energi³, varför en identisk anläggning inte bör vara aktuell för Ostlänken.

3.3 AT - system

Längs linjen ansluts autotransformatorer mellan kontaktledning och AT-matarledning. På mitten av transformatorns lindning ansluts S-rälen. Spänningen i kontaktledning och matarledning ligger 180° i motfas. Både kontaktledning och AT-matarledning har nominell spänning (15 kV/25 kV beroende på system) gentemot S-räl, den ena negativ och den andra positiv. Spänningen mellan kontaktledning och AT-matarledning blir därför dubbel (30/50 kV) gentemot nominell spänning. Tåget har kontakt med kontaktledning och S-räl och matas därför med spänningen 15/25 kV. Strömmen leds genom loket ner i S-rälen vidare till autotransformatorerna. Därifrån leds strömmen tillbaka till elmatningsstationen. Om autotransformatorerna har märkeffekt 5 MVA och linjeströmmen överstiger 600 A krävs vid AT-gränsen två transformatorer (Banverket, 2009a). Se figur 11 för en schematisk skiss över AT-system.

³ Skriftlig källa, kontakt via e-post: Rolf Sundqvist. Driftledare järnväg, Öresundskonsortiet.



Figur 11: AT-systemets uppbyggnad. Bearbetad efter (Banverket, 2009a, s. 5).

Avståndet mellan autotransformatorer kan i Sverige med 15 kV-systemet enligt (Reijm, 2006) vara upp till 12 km, men brukar sättas till omkring 10 km. I Finland där 25 kV-system med AT används är AT-avstånd cirka 7 km, med syfte att begränsa rälspotential och störningar på kringliggande utrustning (Tiippana, 2010). Enligt (Trafikverket, 2013c) har Sverige liknande förutsättningar som Finland och ett rimligt antagande är därför att 7 km passar även i Sverige vid 25 kV-system. Dessutom placeras en autotransformator på respektive sida om 25 kV-systemets sektioneringspunkter (Delcan-Arup Joint Venture, 2010).

4 Dimensionerande förutsättningar

Betydande faktorer vid dimensionering av kraftförsörjning är trafikeringstyp samt förväntad trafikmängd. Dessutom är det viktigt att fastställa lämplig redundansnivå för anläggningen.

4.1 Trafikeringsmängd

Det tänkta höghastighetsnätets exakta trafikering är i detta skede omöjligt att förutspå. En dimensioneringsgrund är att sträckan Stockholm-Linköping ska kunna trafikeras av 400 meter långa tåg med fem minuters lucka (Trafikverket, 2014b), vilket tillämpas vid rapportens kraftdimensionering.

4.2 Fordonsegenskaper

Äldre eldrivna spårfordon är tyristorstyrda och har därför låg effektfaktor. I nyare används inte längre tyristorstyrning och effektfaktorn är nästintill ett. Då krävs mindre ström för att uträtta samma mekaniska arbete och energiförlusterna i överföringssystemet minimeras därför av att nyare spårfordon trafikerar. Majoriteten av ny tillverkade spårfordon på skandinaviska marknaden har sedan tidigt 90-tal effektfaktor nära ett (Andersson & Lukaszewicz, 2006). Ostlänkens trafik antas vara fordon som inte utnyttjar tyristorstyrning, varför hänsyn till en låg effektfaktor inte tas. Därför antas värdet vara 0,98 vid beräkningar i kapitel 6.

4.3 Redundans

Enligt (Trafikverket, 2013a) ska trafiken inte inskränkas vid bortfall av en omformarstation. Om samtida trafikstörningar föreligger kan det dock accepteras att tågens accelerationsförmåga begränsas. Vid scenariot att 25 kV-system anläggs antas motsvarande gälla för bortfall av transformatorstation.

5 Dimensionering

Effektdimensioneringen baseras på att trafikmängden enligt kapitel 4.1 accelererar simultant. För att få ett realistiskt resultat används maximal traktionseffekt för ett modernt höghastighetståg med driftshastighet 320 km/h och längd 400 m, vilket motsvarar vad som skulle kunna tas i bruk på Ostlänken. Referenståg är Siemens Velaro e320 som ska trafikera London - Paris - Bryssel genom Eurotunneln. Vissa tekniska specifikationer angående prestanda har uppskattats. Se tabell 1 för tågdata.

Tabell 1: Tågdata för Siemens Velaro e320 (Siemens, 2012a).

| | |
|---|--------------------------------|
| Tåglängd | 400 m |
| Antal sittplatser | >900 st |
| Driftshastighet | 320 km/h |
| Maximal traktionseffekt | 16 MW |
| Traktionseffekt vid konstant hastighet | 3 MW (antaget) |
| Traktionseffekt vid inbromsning | 0 MW (antaget) |
| Accelerationsförmåga | 0,3 m/s ² (antaget) |
| Retardationsförmåga | 1 m/s ² (antaget) |

5.1 15 kV-system

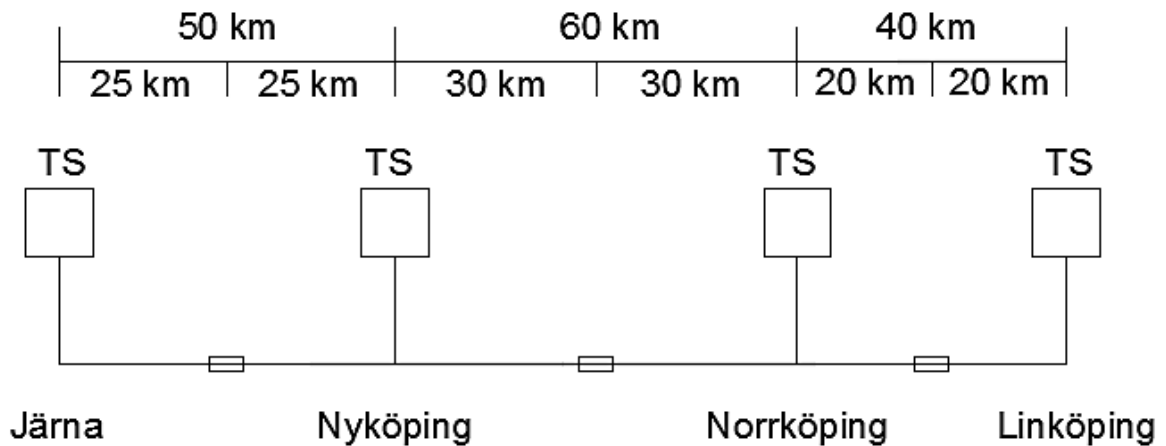
I dagsläget finns det omformarstationer i Järna, Nyköping, Eksund och Mjölby enligt figur 12. Om 15 kV-system används krävs ingen elektrisk separering från befintliga banor och omformarstationer. Detta innebär att befintliga omformarstationer troligtvis kommer vara delaktiga i elmatningen till Ostlänken. Vid utbyggnad av omformarstationer bör den utökade effekten täcka det effektbehov Ostlänken ställer med hänsyn till trafikering och redundans. I annat fall skulle inkopplingen av Ostlänken ge minskad robusthet på redan befintligt traktionsnät. Om tågen kör med STH (320 km/h) kan maximalt tolv tåg befinna sig på Ostlänkens 150 km långa dubbelspårsanläggning, vilket gör att den maximala uteffekten blir 192 MVA. För att uppfylla kraven skulle nämnda omformarstationer behöva byggas ut med en effekt om 64 MVA vardera. Då kan trafiken fortsätta utan inskränkning även om en omformarstation fallerar.



Figur 12: Karta över omformarstationer i Ostlänkens närområde. Bearbetad efter (Järnvägsstyrelsen, 2008, s. Bilaga 1).

5.2 25 kV-system

Vid val av 25 kV-systemet erhålls ett nytt isolerat traktionsnät. Höghastighetstågens accelerationsförlopp kräver mycket effekt, samtidigt som 25 kV-systemet snabbt blir ineffektivt vid längre avstånd på grund av enkelmatning. Därför är det viktigt att placera transformatorstationerna i nära anslutning till de vanligaste accelerationssträckorna. Dessutom krävs att transformatorstationer finns i anslutning till banans start- och slutpunkt för att möjliggöra god redundans. Transformatorstationerna kan vara placerade med avstånd cirka 40-100 km från varandra (White, 2013). Med anledning av ovanstående skulle ett lämpligt och långsiktigt effektivt alternativ i praktiken vara att anlägga transformatorstationer nära stationer med resandeutbyte. Dessa ligger på kilometer 0 (Järna), 50 (Nyköping), 110 (Norrköping) och 150 (Linköping). Möjligheten att anpassa transformatorstationernas placeringar bedöms större än för omformarstationer då de är betydligt mindre utrymmeskrävande. Se figur 13 för lämplig placering av transformatorstationer längs Ostlänken.



Figur 13: Principskiss över möjlig placering av transformatorstationer.

Som en följd av traktionsnätets uppbyggnad (se kapitel 3.2) krävs en transformator per sektion. Vid bortfall av en transformator kan en annan som längst behöva kraftförsörja 55 km, vilket motsvarar två tåg per riktning och därmed en uteffekt om 64 MVA. För att få god redundans på hela Ostlänken bör det finnas totalt sex transformatorer med märkeffekt 64 MVA, en placerad i Järna och en i Linköping samt två i Norrköping och Nyköping.

5.3 Överdimensionering

Dimensioneringskraven som nämnts angående trafikeringsmängd i kapitel 4.1 är högt ställda. Hösten 2013 trafikerades sträckan Linköping-Norrköping av 103 persontåg per dygn och riktning (Trafikverket, 2013d).

Passagerarkapaciteten med nuvarande trafikeringsmängd är, antaget 300 sittplatser per tåg, 61 800 personer per dygn. Skulle höghastighetsågen köras var femte minut mellan klockan 05:00 – 22:00 skulle istället 340 tåg köra på sträckan under ett dygn. Enligt (Siemens, 2012a) finns 900 sittplatser per 400-meterståg. Kapaciteten är då 18 000 personer per timme och 306 000 personer per dygn. Detta skulle innebära en maximal kapacitetsökning med 395 % i förhållande till idag.

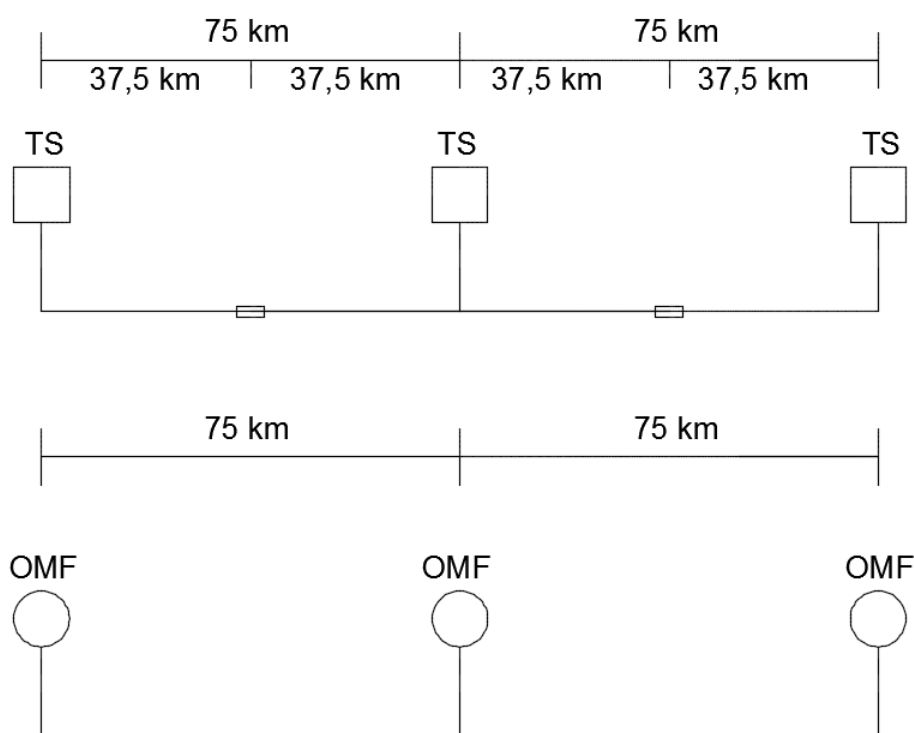
6 Överföringsförluster

Vid transformering, frekvensjustering och transport omvandlas en del elenergi till värme, vilken då betraktas som förlorad energi. De största energiförlusterna i ett traktionssystem sker vid frekvensjustering och transport av elektrisk energi i ledningar. Energiförlusternas storlek beror på överföringssystemets impedans samt trafikerande tågs egenskaper.⁴ Vid beräkningar används egenskaper enligt tabell 1 i kapitel 5.

I detta avsnitt presenteras jämförelser mellan 15- och 25 kV-systemens energieffektivitet. Detta görs dels vid lika och förenklade förutsättningar (kapitel 6.1) för att illustrera skillnaden mellan systemen, dels vid förutsättningar som är rimliga att anta vid en praktisk tillämpning på Ostlänken (kapitel 6.2). I kapitel 6 tas ingen hänsyn till återmatning.

6.1 Systemjämförelse med lika förutsättningar

Transformatorstationerna placeras vid kilometer 0,75 och 150 med Järna som utgångspunkt. Omformarstationer placeras i samma punkter i syfte att ge en tydlig och översiktlig jämförelse av systemens överföringsegenskaper. Se figur 14 för en principskiss över scenariots elmatningsupplägg.



Figur 14: Principskiss över elmatningsstationernas placering.

⁴ Muntlig källa: Christer Lindgren, Järnvägsskolan, Trafikverket.

6.1.1 Metod vid energiförlustberäkningar

Beräkningar genomförs i en förenklad simuleringsmodell framtagen i Excel. Modellen utför 1500 punktberäkningar längs Ostlänken, det vill säga en beräkningspunkt per hundra meter. I detta scenario simuleras en last som rör sig från punkt A (Järna) till punkt B (Linköping) med konstant hastighet om 320 km/h och konstant aktiv effekt om 3 MW.

6.1.1.1 Beräkna systemets impedans

Till Ostlänken antas Trafikverkets överföringssystem med lägst impedans användas. Enligt (Jiang, 2007) är det ett AT-system med två AT-matarledningar, förstärkningslina, jordlina och 120 mm² kabelarea. Impedansen hos ett överföringssystem består av en resistiv och en reaktiv del enligt formel 1.

$$Z = R + jX \quad (1)$$

Där

$Z =$ Impedans

$R =$ Resistans

$X =$ Reaktans

Ett överföringssystem byggs upp av flera ledare. En ledares resistiva del bestäms av dess fysiska uppbyggnad enligt formel 2. Ändrad spänning och frekvens påverkar inte resistansen i ett överföringssystem.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (2)$$

Där

$\rho =$ Materialets resistivitet

$l =$ Ledarens längd

$A =$ Ledarens tvärsnittsarea

Den reaktiva delen bestäms av formel 3 och påverkas därför av 25 kV-systemets tre gånger högre frekvens. Sambandet mellan frekvens och reaktans är linjärt, varför reaktansen blir tre gånger så hög i förhållande till 15 kV-systemets.

$$X = 2\pi \cdot f \cdot L \quad (3)$$

Där

$f =$ frekvens

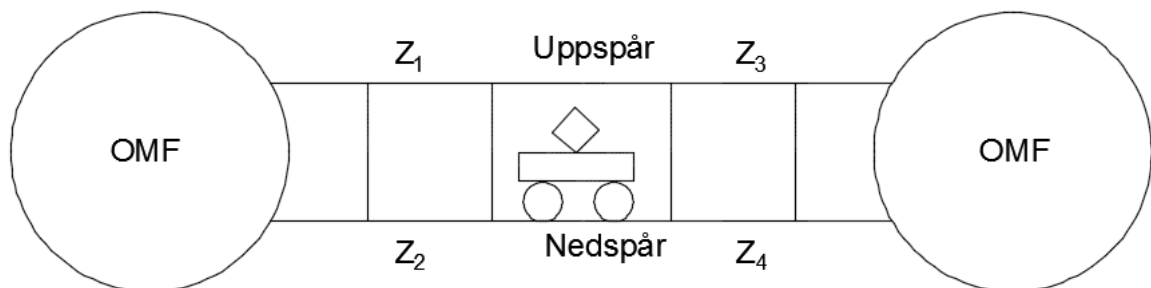
$L =$ induktans

Impedansen i en punkt beror på överföringssystem, avstånd från elmatningsstation, spänningens frekvens och på antalet autotransformatorer (inmatningspunkter) strömmen passerar. Se tabell 2 för en sammanställning av resistans och reaktans hos respektive system.

Tabell 2: Impedans vid 15 kV- (Jiang, 2007) respektive 25 kV-system.

| | 15 kV 16 2/3 Hz | 25 kV 50 Hz |
|--------------------------------------|-----------------|-------------|
| Resistans vid inmatningspunkt | 0,189 | 0,189 |
| Reaktans vid inmatningspunkt | j0,293 | j0,879 |
| Resistans per kilometer | 0,0335 | 0,0335 |
| Reaktans per kilometer | j0,031 | j0,093 |

Vid dubbelspårsanläggningar kan respektive spårs överföringssystem parallellkopplas genom kontinuerliga X-kopplingar (Banverket, 2007). Konceptet antas vara aktuellt på Ostlänken för att minimera impedansen, eftersom höghastighetståg är mycket effektkrävande. I simuleringen antas X-koppling ske i varje beräkningspunkt oavsett traktionssystem. Vid beräkning av 15 kV-systemets impedans tas dessutom hänsyn till att sträckan dubbelmatas. Elektriskt kan detta betraktas som en parallellkoppling av sträckorna mellan tåg och de två närliggande omformarstationerna. Se figur 15 och formel 4 för impedansberäkning i tågets position med 15 kV-systemet.



Figur 15: De olika delsträckorna vid impedansberäkning i 15 kV-systemet.

$$Z_{15\text{ kV}} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}} + \frac{1}{\frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4}}} \quad (4)$$

Där

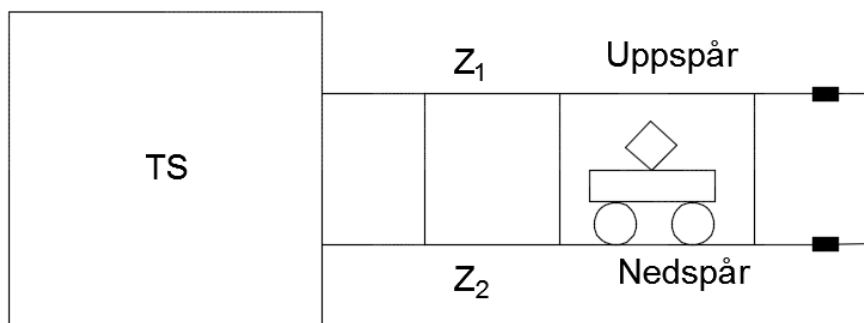
Z_1 = Impedans mellan tåg och matningsstation åt vänster på uppspår

Z_2 = Impedans mellan tåg och matningsstation åt vänster på nedspår

Z_3 = Impedans mellan tåg och matningsstation åt höger på uppspår

Z_4 = Impedans mellan tåg och matningsstation åt höger på nedspår

Med 25 kV-system matas tåget alltid bara från ett håll. Enkelmatningen bidrar till att impedansen är högre i detta system. Se figur 16 och formel 5 för impedansberäkning i tågets position med 25 kV-system.



Figur 16: De olika delsträckorna vid impedansberäkning i 25 kV-systemet.

$$Z_{25\text{ kV}} = \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}} \quad (5)$$

Där

Z_1 = Impedans mellan tåg och närmaste matningsstation på uppspår

Z_2 = Impedans mellan tåg och närmaste matningsstation på nedspår

Respektive impedans i formel 4 och 5 bestäms i sin tur av formel 6.

$$Z_x = l_{km} \cdot Z_{km} + x_{AT} \cdot Z_{AT} \quad (6)$$

Där

l_{km} = Avstånd från omformarstation till tåg i kilometer

Z_{km} = Impedansen per kilometer överföringssystem

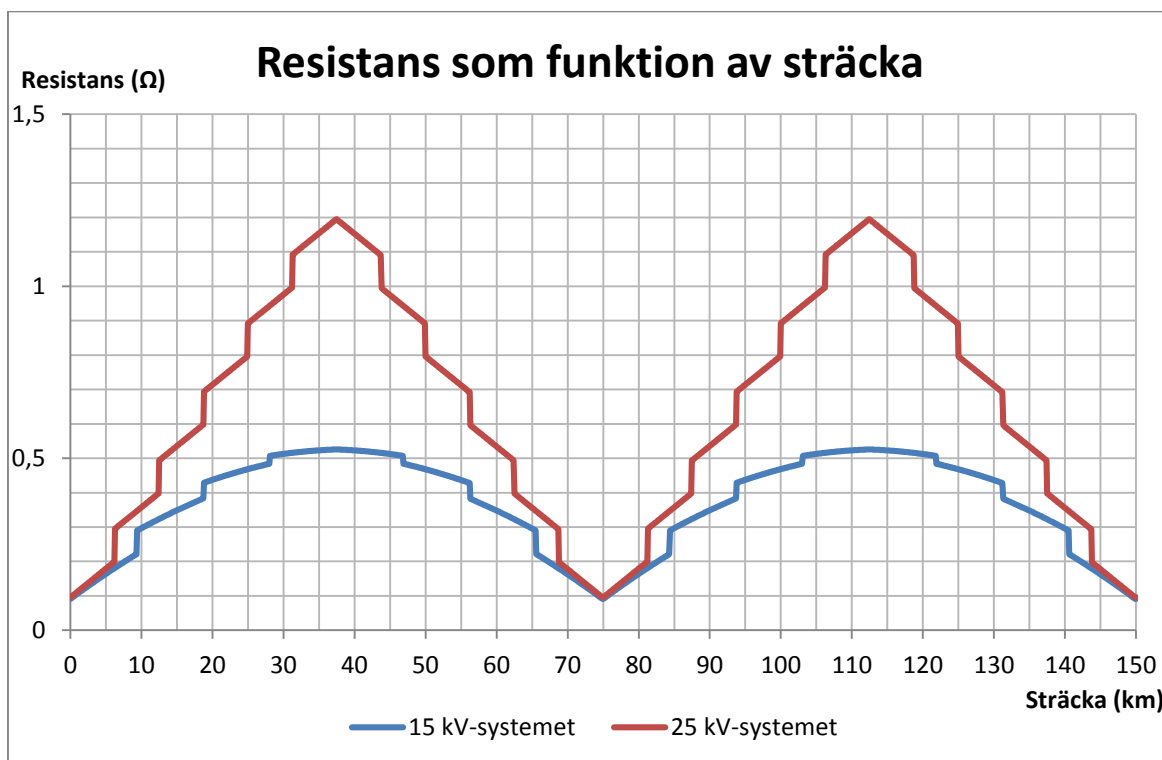
x_{AT} = Antalet AT mellan tåg och omformarstation

Z_{AT} = Impedansen vid varje AT

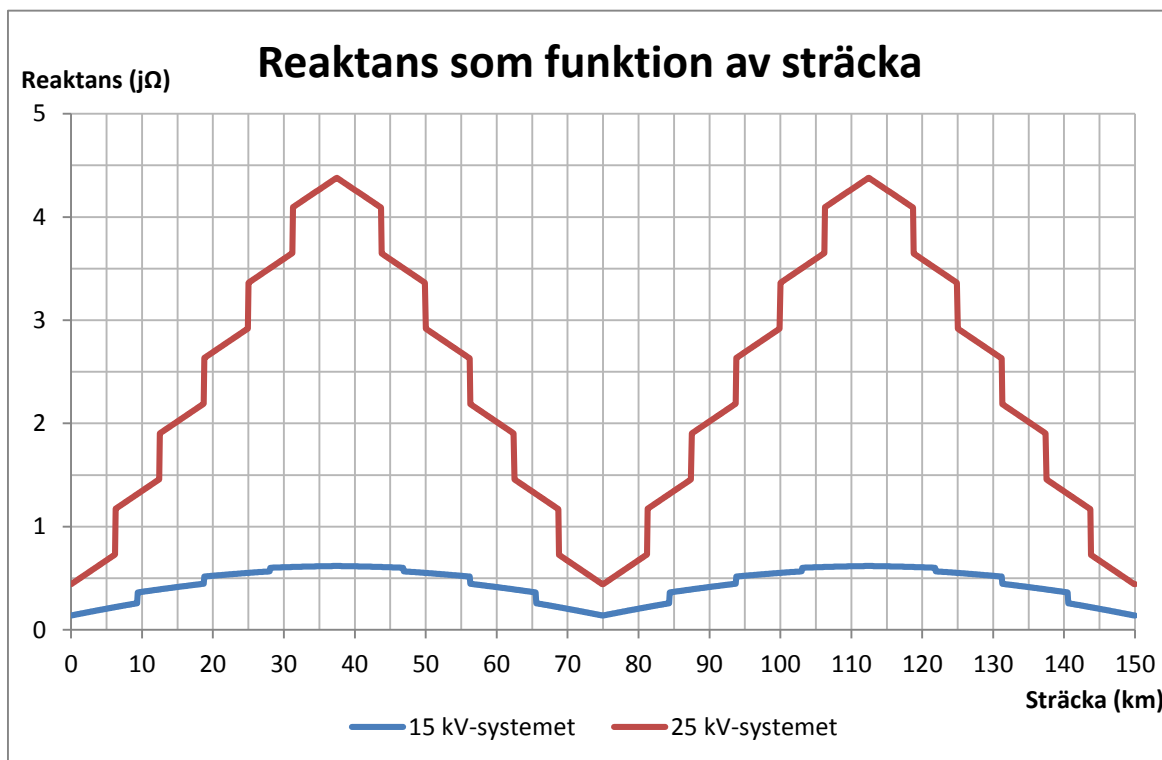
Ovanstående beräkningsgång ger att impedansen förändras linjärt med sträckan inom ett AT-fönster. I praktiken är så inte fallet, men i syfte att beräkna energiförluster ger förenklingen liten påverkan på resultatet.⁵

I figur 17 och 18 presenteras resistans och reaktans som funktion av sträcka för respektive traktionssystem.

⁵ Skriftlig källa, kontakt via e-post: Thorsten Schütte, Senior Scientist, Atkins Sverige AB.



Figur 17: Resistans med 15 kV- respektive 25 kV-system.



Figur 18: Reaktans med 15 kV- respektive 25 kV-system.

Den i 25 kV-systemet relativt höga resistansen beror på att systemet har tätare placerade autotransformatorer och enkelmatas. Varje autotransformator som strömmen behöver passera ger upphov till högre resistans och reaktans, vilket åskådliggörs av diagrammens periodiska vertikala språng. Gällande

reaktansen tillkommer en tre gånger så hög frekvens som ytterligare ökar differensen systemen emellan.

6.1.1.2 Beräkning av spänningsfall

Impedansen i överföringssystemet leder till spänningsfall. För att beräkna strömmen som tåget drar i en specifik position måste spänningen vid tågets strömavtagare beräknas. Detta görs enligt formel 7.

$$U_T = \frac{1}{2} \left(U_S + \sqrt{U_S^2 - 4[(P \cdot R + Q \cdot X) + j(P \cdot X - Q \cdot R)]} \right) \quad (7)$$

Där

U_T = Spänning vid tåget

U_S = Utmatningsspänning

P = Aktiv effekt

Q = Reaktiv effekt

Som nämnts tidigare är den aktiva effekten i detta scenario konstant 3 MW. Den reaktiva effekten beror på lastens effektfaktor ($\cos \varphi$) som hos moderna spårfordon är mycket nära ett (se kapitel 4.2). Eftersom verkligheten sällan speglar den ideala teorin antas effektfaktor 0,98. Effektfaktorn används för att beräkna fasvinkeln enligt formel 8.

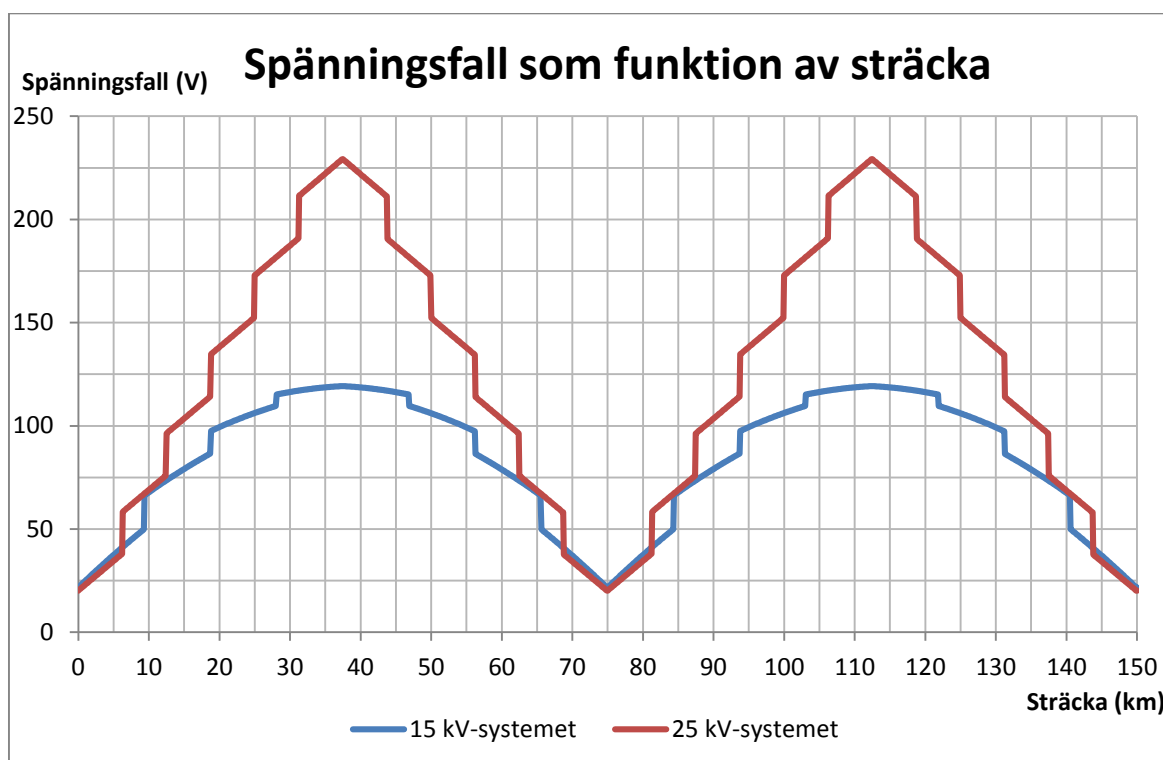
$$\varphi = \cos^{-1}(\cos \varphi) \quad (8)$$

Vidare används fasvinkeln för att beräkna reaktiv effekt enligt formel 9.

$$Q = P \cdot \tan \varphi \quad (9)$$

I 15 kV-systemet matas 16,5 kV ut för att ge marginal och undvika för låg spänning till fordonen vid spänningsfall (Biedermann, 2002). Med samma procentuella marginal i 25 kV-systemet matas 27,5 kV ut. Vid beräkningarna har konstanta utmatningsspänningar om 10 % över de nominella antagits vara upprätthållna. Spänningsfall beräknas enligt formel 10, och resulterar i figur 19.

$$\Delta U = U_S - U_T \quad (10)$$



Figur 19: Spänningsfall med 15 kV- respektive 25 kV-system.

6.1.1.3 Beräkning av ström

Värmeförluster vid energiöverföring i ledningar beror bland annat på hur stor ström som finns i ledningarna. Både konsumerad aktiv och reaktiv effekt ger upphov till strömmar. Strömmarnas storlek bestäms av aktiv och reaktiv effekt tillsammans med spänning vid strömavtagaren, enligt formel 11 och 12.

$$I_R = \frac{P}{U_T} \quad (11)$$

$$I_X = \frac{Q}{U_T} \quad (12)$$

Strömmen som krävs för att leverera önskad effekt är mindre hos 25 kV-systemet på grund av den högre spänningen, enligt formel 11 och 12.

6.1.1.4 Beräkning av energiförluster

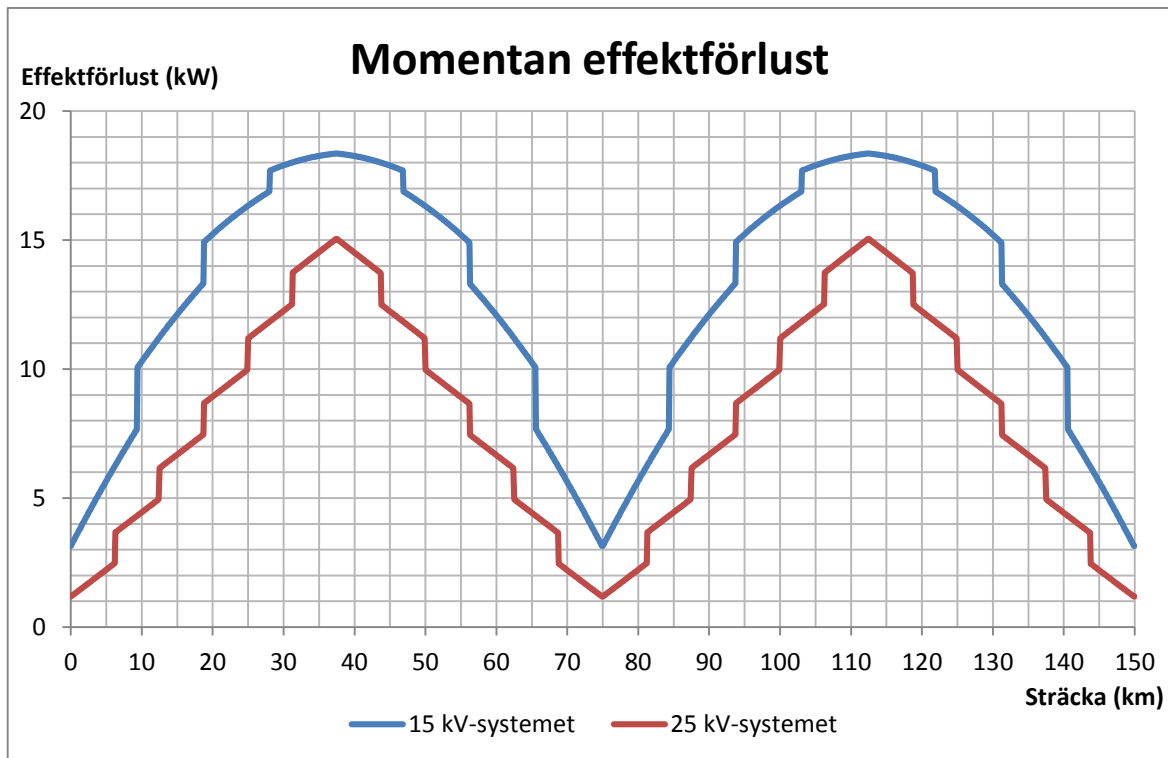
Momentan effektförlust i överföringssystemet är beroende av ström och resistans enligt formel 13. Eftersom simuleringen grundar sig på moderna lok försummas eventuella övertonsströmmar.

$$\Delta P = (I_R^2 + I_X^2 + I_0^2) \cdot R \quad (13)$$

Där

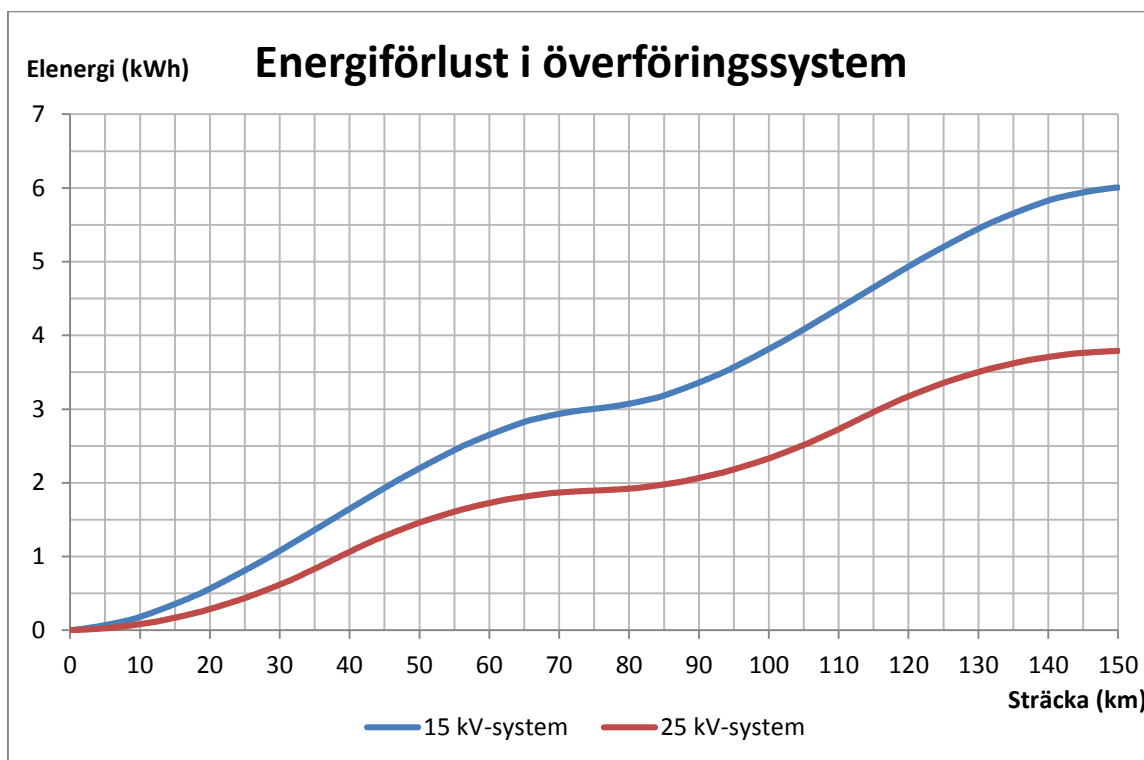
I_0 = Övertonsström

Trots att resistansen är högre i 25 kV-systemet ger den lägre strömmen upphov till mindre effektförlust än i 15 kV-systemet. Figur 20 presenterar momentana effektförluster över en tågkörning.



Figur 20: Momentan effektförlust med 15 kV- respektive 25 kV-system.

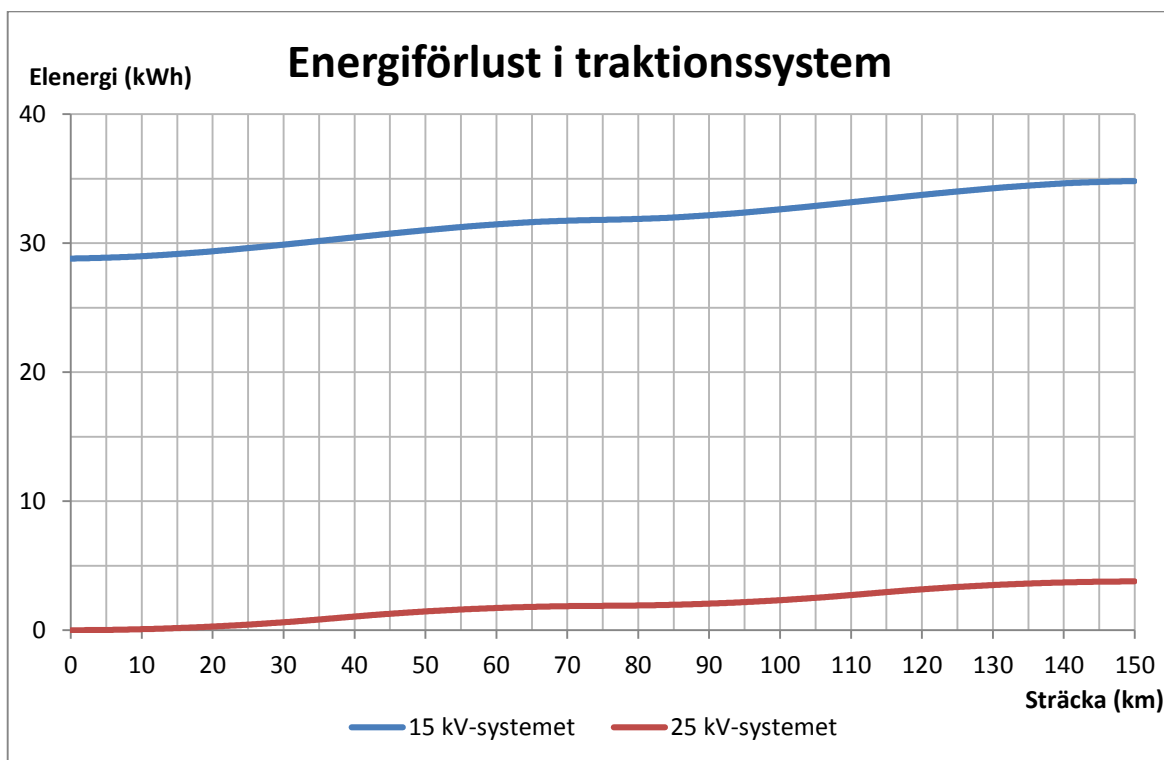
Genom att sätta momentan effektförlust som funktion av tid, integrera numeriskt och löpande summera energiförlusterna i överföringssystemet för respektive traktionssystem erhålls figur 21.



Figur 21: Energiförlust vid överföring med 15 kV- respektive 25 kV-system.

Hittills presenterade resultat innefattar endast energiförluster i överföringssystemet. Utöver dessa förekommer energiförluster vid elmatningsstationer mellan trefasnätet och järnvägens överföringssystem. I 15 kV-systemet sker först en nedtransformering, varefter frekvensjustering krävs innan utmatning. I 25 kV-systemet sker endast en nedtransformering till rätt spänningsnivå då frekvensen redan är rätt. Eftersom nedtransformering från trefasnätets högspänning krävs oavsett traktionssystem samt eftersom energiförlusterna i detta steg är låga, tas inte hänsyn till förluster vid transformering. Vad gäller energiförluster innan överföringssystemet nås tas således hänsyn endast till verkningsgraden i omriktare.

Den mest moderna och effektiva omriktarmodell som använts i Sverige, Siemens Sitras SFC Plus, antas användas vid utbyggnad av 15 kV-system på Ostlänken. Omriktaren används i Häggvik och Eskilstuna (Siemens, 2012b) och har verkningsgraden 98 % när den belastas med 3 MW enligt (Burlein & Gruber, 2013). Energiförluster inklusive omriktning presenteras i figur 22.



Figur 22: Energiförlust med 15 kV- respektive 25 kV-system.

Figur 22 illustrerar tydligt den fördel 25 kV-systemet har ifråga om energieffektivitet, främst eftersom frekvensjustering uteblir. Eftersom överföringsförlusterna ökar kvadratisk med strömmen medför mer effektkrävande laster att överföringsförlusterna utgör en större andel av den totala energiförlusten.

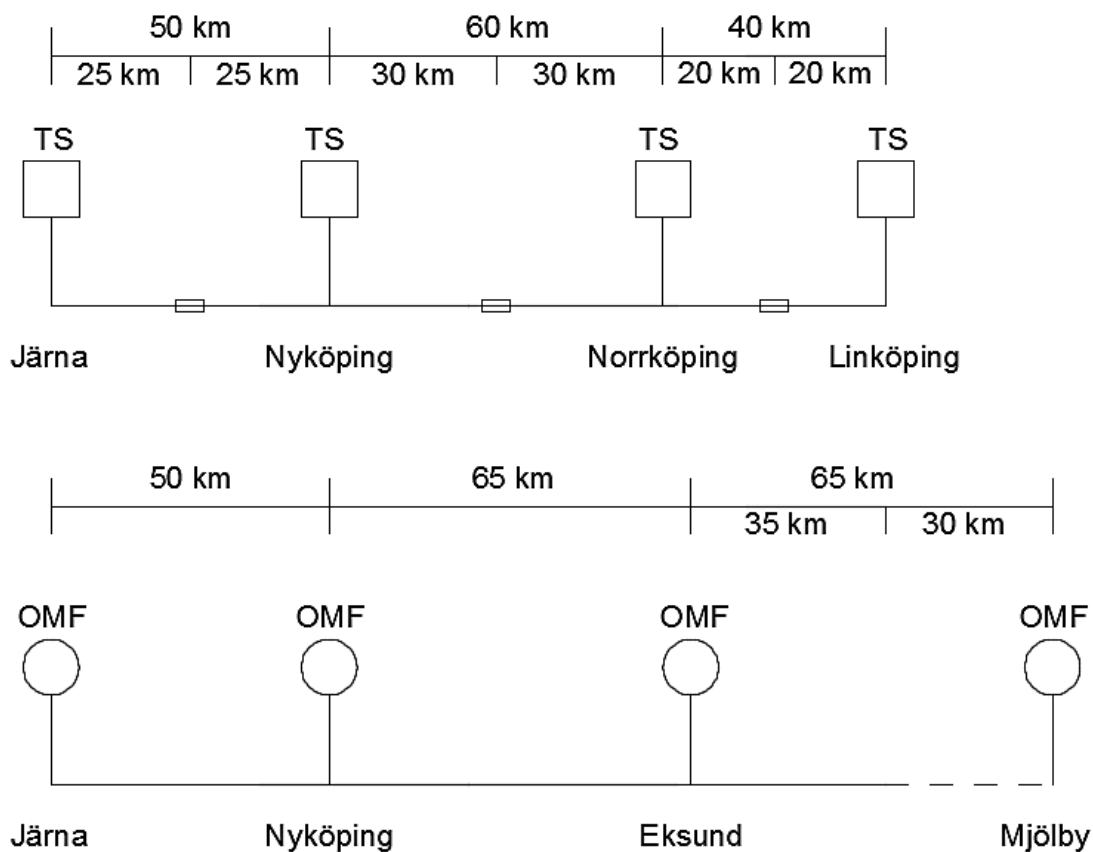
6.2 Systemjämförelse vid förutsättningar rimliga på Ostlänken

Under denna rubrik presenteras simuleringsresultat motsvarande de i kapitel 6.1, dock med förutsättningar som antas vara rimliga på Ostlänken.

6.2.1 Förutsättningar och resonemang

Istället för en konstant effekt och hastighet simuleras olika aktiva effekter vid acceleration (16 MW), konstant hastighet (3 MW) och retardation (0 MW). STH 320 km/h kvarstår och maximal accelerations- och retardationsförmåga antas utnyttjas under hela det aktuella förloppet. I detta scenario återger simuleringen en tågkörning med start i Järna och efterföljande stopp i Nyköping, Norrköping samt Linköping.

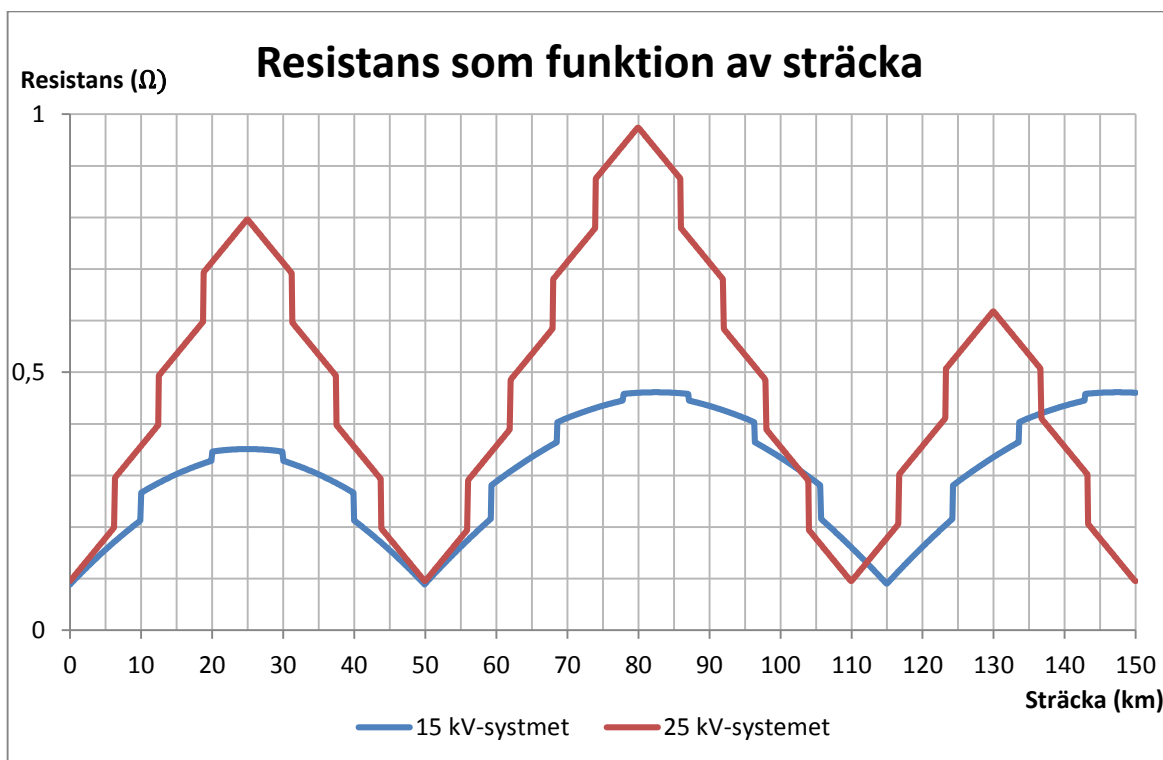
Med anledning av resonemang i kapitel 5.1 och 5.2 antas två alternativ finnas för Ostlänkens traktionssystem. Antingen 15 kV-system med utbyggnad av befintliga omformarstationer i Järna, Nyköping, Eksund och Mjölby, eller 25 kV-system med nybyggnation av transformatorstationer i eller i nära anslutning till Järna, Nyköping, Norrköping och Linköping. Se figur 23 för en principskiss över elmatningsupplägget.



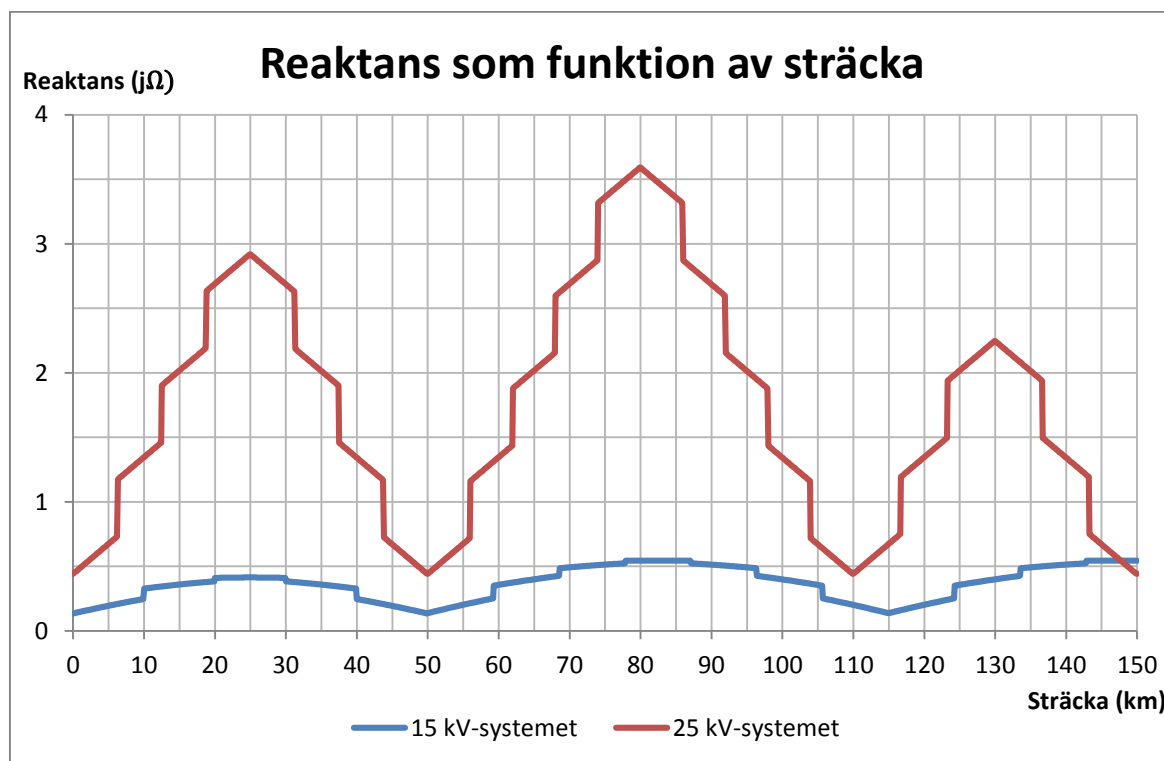
Figur 23: Principskiss över elmatningsstationernas placering.

6.2.2 Beräkningsresultat

Förutsättningarna leder till att resistans och reaktans förändras gentemot kapitel 6.1. Fler elmatningsstationer ger lägre impedans. Se figur 24 och 25 för redogörelse över resistans och reaktans.

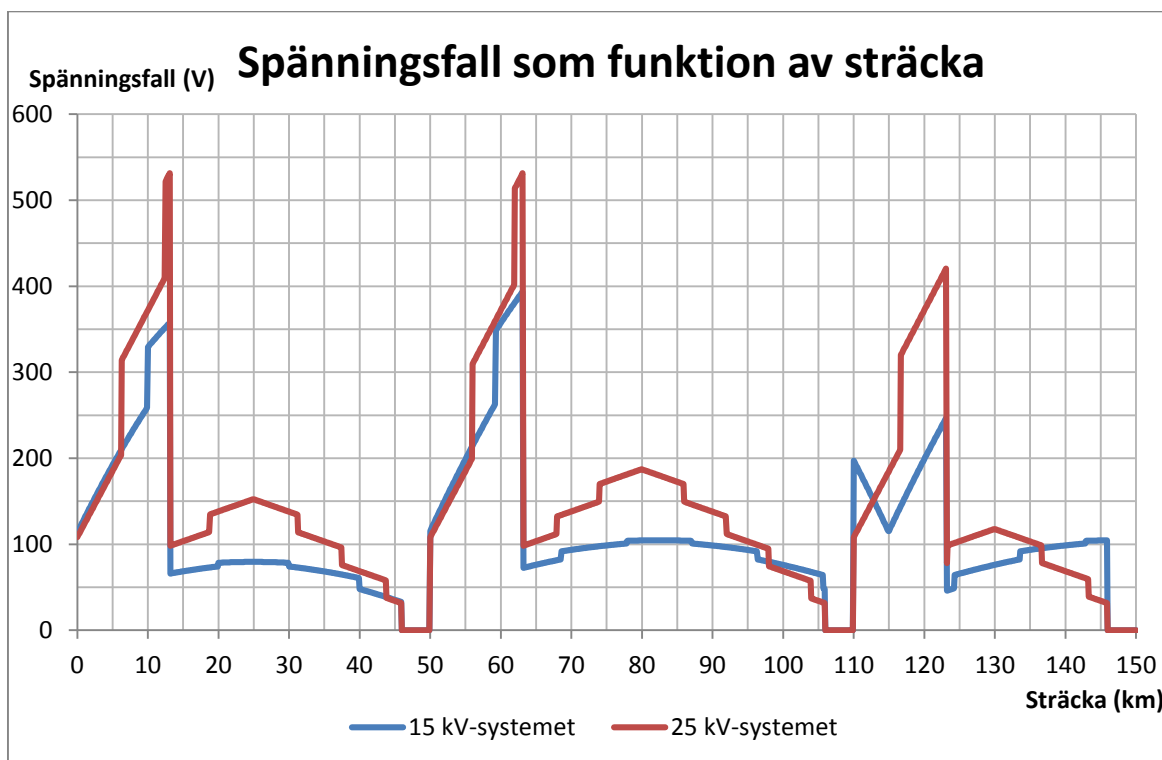


Figur 24: Resistans med 15 kV- respektive 25 kV-system.

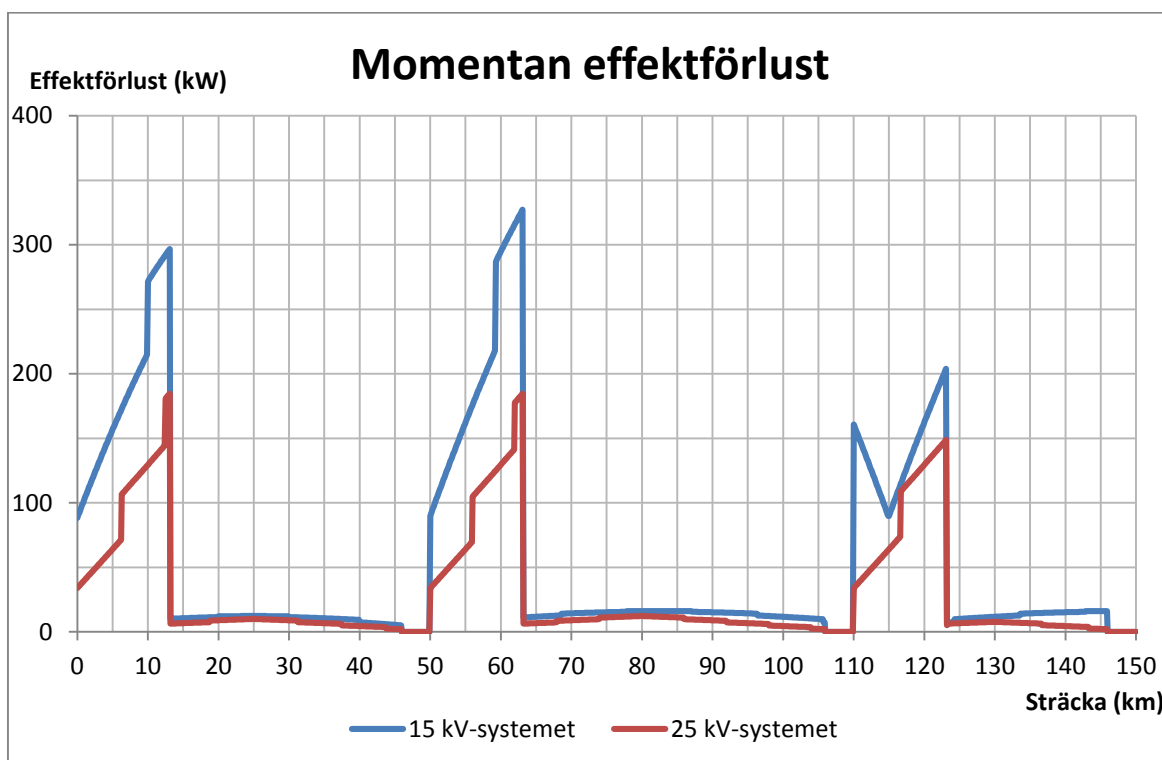


Figur 25: Reaktans med 15 kV- respektive 25 kV-system.

Med hänsyn till varierande effektuttag samt lägre resistans och reaktans ges spänningsfall enligt figur 26, vilket leder till momentana effektförluster enligt figur 27.



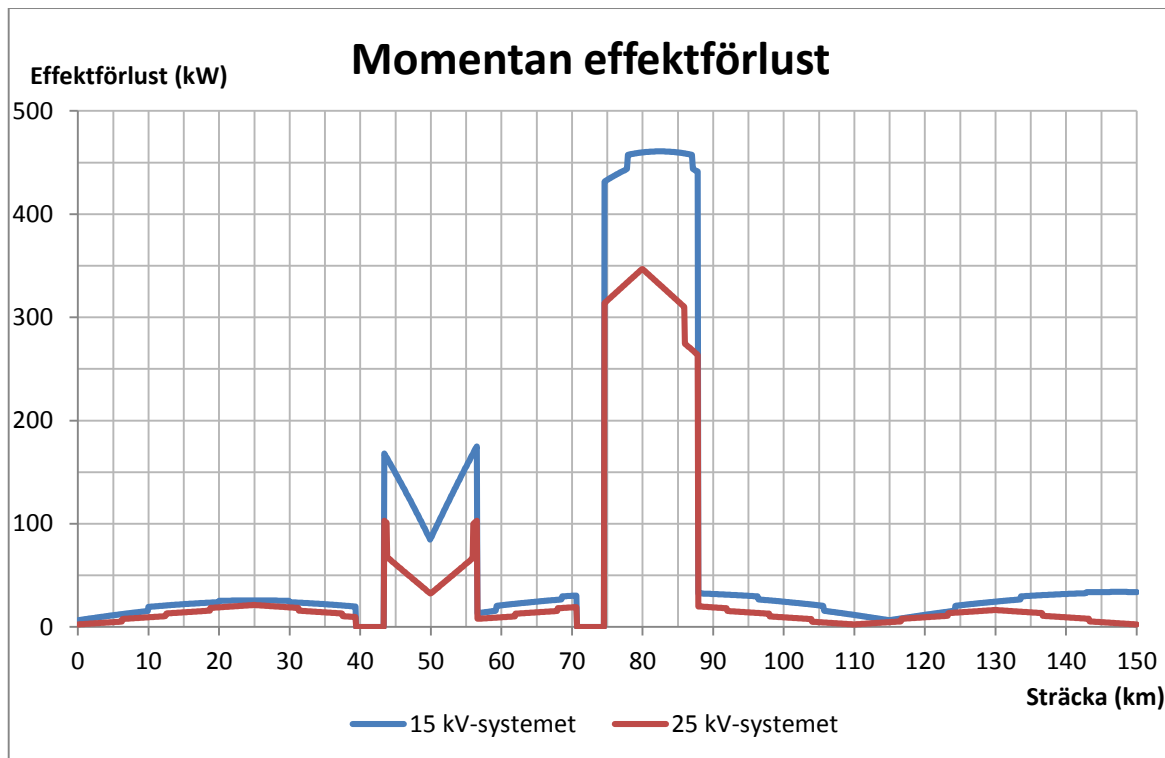
Figur 26: Spänningsfall med 15 kV- respektive 25 kV-system.



Figur 27: Momentan effektförlust med 15 kV- respektive 25 kV-system.

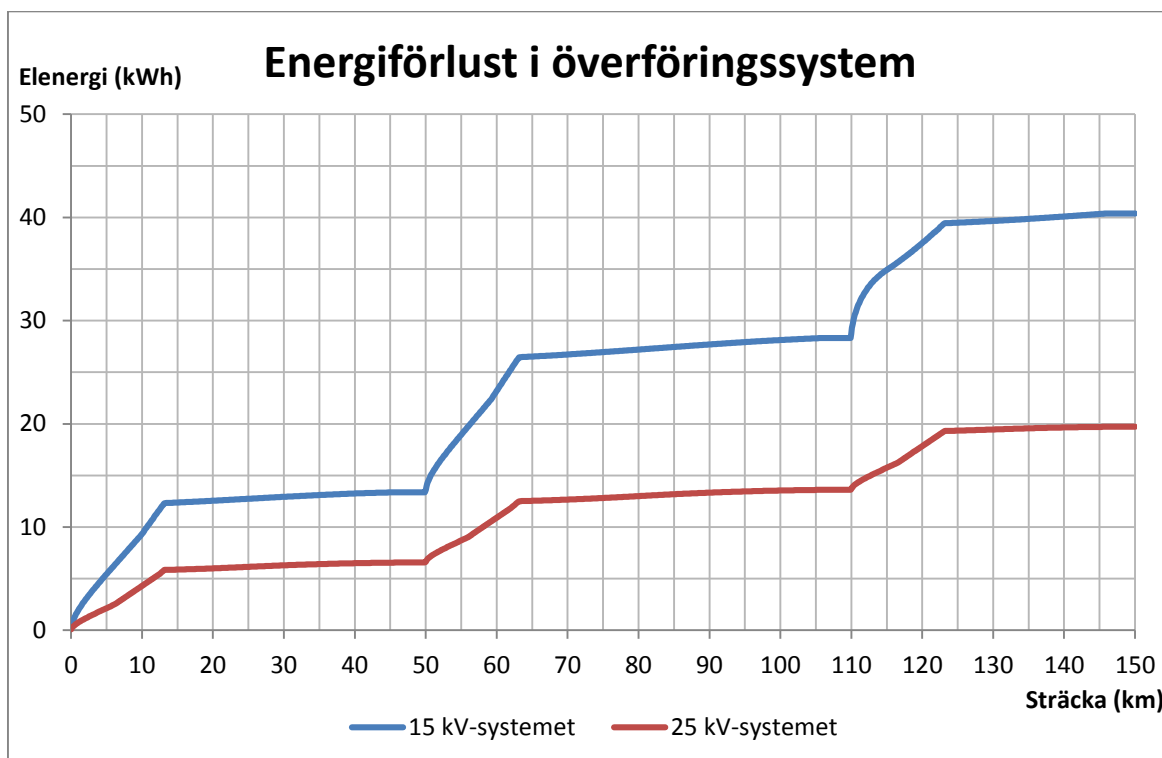
Elmatningsstationernas placering i förhållande till tågens vanligaste accelerationsträckor är viktig för att minimera energiförlusterna, oavsett traktionssystem. Vid den tredje toppen i figur 27 är effektförlusten med 15 kV-system lägre än vid de två första. Anledningen är att en omformarstation är

placerad strax efter stationsuppehåll och därmed i accelerationssträckan. För att tydligare illustrera detta simuleras momentan effektförlust när elmatningsstationer ligger intill respektive långt ifrån accelerationssträckan. Resultatet presenteras i figur 28. Den första accelerationssträckan sker intill en elmatningsstation, medan den andra sker mitt emellan två stycken.



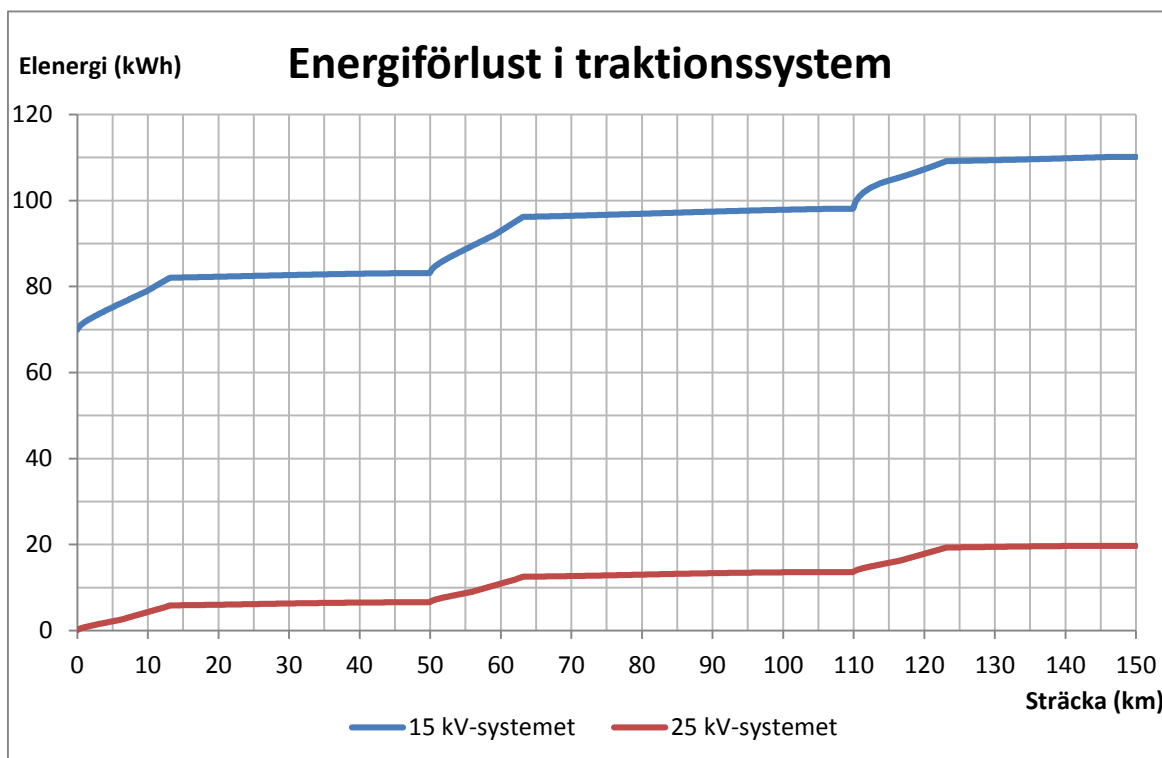
Figur 28: Betydelsen av elmatningsstationernas placering för momentan effektförlust med 15 kV- respektive 25 kV system.

Momentana effektförluster enligt figur 27 leder till energiförluster i överföringssystemet som presenteras i figur 29.



Figur 29: Energiförlust vid överföring med 15 kV- respektive 25 kV-system.

Energiförluster vid en tåγκörning är betydligt högre än i kapitel 6.1. Det beror på att det genomsnittliga effektuttaget är 7,71 MW, istället för 3 MW. Vid medelbelastningen 7,71 MW har omriktaren verkningsgrad 98,6 %, enligt (Burlein & Gruber, 2013). Det ger upphov till totala energiförluster vid en tåγκörning enligt figur 30.



Figur 30: Energiförlust med 15 kV- respektive 25 kV-system.

Med 15 kV-system simuleras 110 kWh förlorad energi, men endast 20 kWh med 25 kV-system. Således sparas 90 kWh per tåγκörning med sistnämnt system.

6.3 Jämförelse av energiförluster

En överskådlig sammanställning av energiförluster i traktionssystemen visas i tabell 3. Siffrorna grundar sig på förutsättningar och resultat enligt kapitel 6.2. Den ekonomiska betydelsen baseras på drivmotorströmskostnad om 60 öre/kWh. Detta är en ungefärlig siffra ifrån Trafikverkets elprisrapport (Trafikverket, 2014c). På hela sträckan Järna-Linköping är Linköping-Norrköping idag den tyngst trafikerade. Hösten 2013 trafikerades den av 103 persontåg per dygn och riktning (Trafikverket, 2013d). Enligt (SIKA, 2005) är livslängden för ny järnväg 60 år. Den totala ekonomiska besparingen grundas därför på en trafik om 100 höghastighetståγκ per dygn och riktning under denna tid.

Tabell 3: Jämförelse av energiförluster mellan traktionssystemen, per tåγκörning.

| | 15 kV | 25 kV |
|--|-------------|-------------|
| Energiåtgång | 4 980,4 kWh | 4 890,0 kWh |
| Energikostnad | 2 988,2 kr | 2 934,0 kr |
| Energiförluster överföringssystem | 40,4 kWh | 19,7 kWh |
| Energiförluster vid frekvensjustering | 69,7 kWh | - |
| Energiförluster i traktionssystem | 110,1 kWh | 19,7 kWh |
| Kostnad för förlorad energi | 66,1 kr | 11,8 kr |
| Ekonomisk besparing | - | 54,3 kr |
| Ekonomisk besparing över livslängd | - | 238 MSEK |

Resultatet ska endast tolkas som en ungefärlig uppskattning. Beräknad energiåtgång bygger på enskilda isolerade tåγκörningar. Flera sådana efterföljande cykler är ej helt jämförbart med samtida trafikerings av flera närliggande tåγκ.

7 Återmatande broms

I accelerationsförlopp och höjdstigningar omvandlas den till tåget inmatade elenergin till kinetisk energi respektive lägesenergi. Majoriteten av nyare elfordon kan vid bromsning utnyttja motorn som generator, vilken då omvandlar kinetisk energi och lägesenergi tillbaka till elenergi. Den omvända traktionsprocessen benämns regenerativ eller återmatande broms. Den återmatade effekten kan aldrig överstiga motorns traktionseffekt. Återmatad energi kan utnyttjas i något av följande steg:

- Av ombordutrustning på tåget.
- Av andra närliggande tåg, efter återmatning till kontaktledning.
- Av helt annan utrustning än inom järnväg, efter återmatning till trefasnät.

Återmatningsmöjligheterna skiljer sig beroende på installerat traktionssystem och presenteras i detta kapitelns underrubriker. Möjlig procentuell energibesparing varierar kraftigt beroende på banans trafikeringstyp. I lokaltrafik med många stopp och accelerationsförlopp gör återmatning mer nytta än på huvudlinjer med långa stationsavstånd och få bromssträckor (UIC, 2002a).

7.1 Återmatning i 15 kV-systemet

I syfte att överlåta inbromsad energi till andra närliggande tåg har detta traktionssystem en klar fördel. Eftersom hela överföringssystemet består av ett sammankopplat elnät på samma fas kan återmatad energi förse andra tåg som befinner sig relativt långt bort. Således uppstår sällan situationen att andra tåg inte kan utnyttja den återmatade energin (UIC, 2002a).

När nämnd situation ändå uppstår kan möjlighet att återmata energi till trefasnätet finnas. Möjligheterna beror på hur närliggande omformarstationer är utrustade. Av de äldre svenska omriktarmodellerna kan direktomriktaren YOQC och mellanledsomriktaren TGTO återmata till trefasnätet.⁶ Tidigare nämndes omriktaren Sitras SFC Plus som trolig omriktarmodell vid utbyggnad av omformarstationer till Ostlänken. Denna modell har också funktionalitet att återmata energi till trefasnätet (Siemens, 2012b). Om varken närliggande tåg eller återmatningsmöjlighet till trefasnätet via omformarstation finns, kommer överspänningsskyddet i elbromsarna tvinga tåget att istället bromsa mekaniskt (Abrahamsson, Schütte, & Östlund, 2012).

⁶ Muntlig källa: Christer Lindgren, Järnvägsskolan, Trafikverket.

En uppskattad energibesparingspotential anges till 9 % av inmatad energi på huvudlinjer för 15 kV-systemet (UIC, 2002a). Siffran utgår ifrån att endast energin som används av ombordutrustning eller återmatas till kontaktledning och används av andra tåg betraktas som insparad energi.

7.2 Återmatning i 25 kV-systemet

Gällande återmatning till kontaktledning finns här en begränsande faktor. Olika sektioner av järnvägen energiförsörjs av olika faser, vilket betyder att respektive sektion inte kan ha elektrisk kontakt med intilliggande sektioner. Dessutom är sektionerna relativt korta och resultatet blir att det mer sällan i jämförelse med 15 kV-systemet finns närliggande tåg som tar upp energin.

En uppskattad energibesparingspotential anges till 4 % för 25 kV-systemet på huvudlinjer (UIC, 2002b). Siffran utgår ifrån att endast energin som återmatas till kontaktledning och används av andra tåg betraktas som insparad energi.

7.3 Återmatning till trefasnät

Internationellt sett ger kraftleverantören ingen eller mycket låg ersättning för återmatning (UIC, 2002b). Att återmata elenergi till trefasnätet är därför ett mindre attraktivt alternativ än att återmata för närliggande tågs bruk. Samma förutsättningar gäller i Sverige. Anledningen till detta är att kraftleverantörerna tar ut abonnemangavgifter för att möjliggöra ersättning för återmatad el. Abonnemangskostnaden är betydligt högre om återmatningen är oregelbunden, vilket den är från tågtrafiken.⁷ Abonnemangskostnad kombinerat med att det svenska traktionssystemet i regel kan ge energi till närliggande tåg istället gör att Trafikverket inte har några sådana avtal tecknade.⁸

Ett aktuellt projekt inom Trafikverket är att installera energimätare på Sveriges omformarstationer. Då finns möjligheten att kontrollera huruvida återmatning sker, isåfall hur mycket, och därmed avgöra om abonnemang för återmatning till trefasnätet skulle kunna löna sig.⁹

Den enda sträckan i Norden där ett sådant abonnemang finns är från riksgränsen mellan Sverige och Norge ner till Narvik, eftersom malmtåget på Malmbanan återmatar längs sträckan.¹⁰

⁷ Skriftlig källa, kontakt via e-post: Björn Ållebrand, Elkraftingenjör, Trafikverket.

⁸ Skriftlig källa, kontakt via e-post: Torleif Magnusson, Teknisk samordnare omformare, Trafikverket.

⁹ Skriftlig källa, kontakt via e-post: Björn Ållebrand, Elkraftingenjör, Trafikverket.

¹⁰ Ibid.

7.4 Sammanställning av återmatningspotential

Konceptet med återmatande broms bedöms av (UIC, 2002a) och (UIC, 2002b) som mycket lovande i arbetet att minska järnvägstrafikens energikonsumtion. Den uppskattade energibesparingspotentialen för respektive system skiljer sig fem procentenheter, med utgångspunkt från den totala inmatade energin.

Eftersom Ostlänken är en höghastighetsbana med längre avstånd mellan stationerna är inte återmatning av bromsenergi lika betydande som vid lokaltrafik. Å andra sidan är höghastighetståg effektstarka fordon, varför även en låg andel återmatad energi är av betydelse för total energiförbrukning.

Ur återmatningsperspektiv är 15 kV-systemet det mer fördelaktiga alternativet eftersom en större andel av den återmatade energin kan utnyttjas av andra tåg än vid 25 kV-systemet. I tabell 4 redogörs återmatningspotentialen och dess ekonomiska påverkan. Observera att energi återmatad till trefasnätet inte ger upphov till en besparing eftersom ingen ersättning erhålls. Energi som återmatas och utnyttjas av andra tåg betraktas dock som en besparing motsvarande drivmotorströmspriset 60 öre/kWh eftersom den elenergin inte behöver inhandlas.

Tabell 4: Sammanställning av återmatning per tåγκörning.

| | 15 kV | 25 kV |
|---|--------------|--------------|
| Energiåtgång för traktion | 4 980,4 kWh | 4 890,0 kWh |
| Andel återmatad energi | 9 % | 4 % |
| Inmatad energi | 4 532,2 kWh | 4 694,4 kWh |
| Återmatad energi | 448,2 kWh | 195,6 kWh |
| Besparing för återmatad energi | 268,9 kr | 117,4 kr |
| Besparing för återmatad energi över livslängd | 1 178 MSEK | 514 MSEK |
| Besparing i förhållande till annat system över livslängd | 664 MSEK | - |

8 Ekonomisk jämförelse

Den ekonomiska jämförelsen behandlar kostnad för energi, anläggning och underhåll. Alla siffror ska betraktas som riktlinjer med syfte att göra en överskådlig jämförelse.

8.1 Energieffektivitet

I kapitel 6 och 7 har den ekonomiska aspekten inom överföringseffektivitet respektive återmatning redovisats separat. I tabell 5 sammanställs de för att ge en överskådlig bild över total energieffektivitet hos traktionssystemen.

Tabell 5: Ekonomisk översikt inom energieffektivitet, över livslängd.

| | 15 kV | 25 kV |
|--|-------------|-------------|
| Energiåtgång för traktion | 21,81 TWh | 21,42 TWh |
| Kostnad för energiåtgång | 13 088 MSEK | 12 851 MSEK |
| Besparing genom återmatning | 1 178 MSEK | 514 MSEK |
| Slutgiltig energikostnad | 11 910 MSEK | 12 337 MSEK |
| Sammanlagd energieffektivitetsbesparing | 427 MSEK | - |

Resultatet visar att 25 kV-systemet trots sin bättre överföringseffektivitet inte blir mer ekonomiskt fördelaktigt med hänsyn till energieffektivitet. Det beror på den väsentligt sämre möjligheten att utnyttja återmatad energi.

8.2 Anläggningskostnader

I detta kapitel behandlas större kostnadsposter inom anläggning som skiljer sig åt mellan traktionssystemen. Överföringssystemens uppbyggnad är mycket lika, varför de flesta kostnadsposter återfinns i samband med anläggning av elmatningsstationer.

8.2.1 15 kV-systemet

Kostnadsuppskattning av omformarstationernas utbyggnad baseras på siffror från Trafikverkets pågående projekt ”Förstärkt kraftförsörjning”. Projektet innebär nybyggnation av tre omformarstationer samt en utbyggnad (Trafikverket, 2014d). Tabell 6 visar budget och antal omriktare för respektive omformarstation som ingår i projektet.

Tabell 6: Budget för projekt Förstärkt kraftförsörjning.¹¹

| Omformarstation | Åtgärd | Antal omriktare (st) | Omriktareffekt (MVA) | Budget (MSEK) |
|-----------------|-----------|----------------------|----------------------|---------------|
| Lund | Nybyggnad | 2 | 27 | 179 |
| Ystad | Utbyggnad | 1 | 19 | 86 |
| Åstorp | Nybyggnad | 3 | 19 | 243 |
| Älvängen | Nybyggnad | 2 | 27 | 162 |

Kostnaden skiljer sig marginellt vid utbyggnad respektive nybyggnad, samt vid 19 MVA eller 27 MVA omriktare. Därför används för varje nyanlaggd omriktare till Ostlänken en genomsnittskostnad (84 MSEK), baserad på samtliga omriktare som ingår i projekt Förstärkt kraftförsörjning. För att uppnå en uteffekt om 64 MVA per omformarstation (se kapitel 5.1) är tre omriktare á 27 MVA likt de i Älvängen och Lund lämpligt.

I 15 kV-systemet står autotransformatorer på cirka var 10:e kilometer samt vid AT-gränsen utanför omformarstationerna. I kapitel 3.3 anges att det vid AT-gränsen kan behövas två autotransformatorer beroende på linjeströmmen, vilket appliceras vid beräkning av antalet autotransformatorer. Detta gäller dessutom för både upp- och nedspår, vilket resulterar i ett behov av 50 stycken autotransformatorer. I (Trafikverket, II) anges kostnaden för en 5 MVA 33/16,5 kV autotransformator till 1,3 MSEK. På Ostlänken krävs autotransformatorer med betydligt större effekt för att hantera höghastighetstågens acceleration, varför kostnaden uppskattas till 2 MSEK per styck. Tabell 7 sammanställer anläggningskostnaderna för 15 kV-systemet.

Tabell 7: Anläggningskostnader för 15 kV-systemet.

| Anlagd enhet | Antal (st) | Styckpris (MSEK) | Kostnad (MSEK) |
|---------------|------------|------------------|----------------|
| Omriktare | 12 | 84 | 1 008 |
| AT | 50 | 2 | 100 |
| Totalt | | | 1 108 |

8.2.2 25 kV-systemet

Kostnaden för en transformatorstation med två stycken 64 MVA transformatorer (se kapitel 5.2) som matar till en dubbelspårsanläggning med AT uppskattas till 85 MSEK. I kostnadsberäkningen antas därför kostnaden

¹¹ Skriftlig källa, kontakt via e-post: Kristina Johansson, Projektledare Förstärkt kraftförsörjning, Trafikverket.

vara 42,5 MSEK per transformator. Därtill ska respektive transformatorstation kopplas in, vilket kostar cirka 6 MSEK styck.¹²

Om traktionsnätet kopplas in på något annat trefasnät än 400 kV-nivå med hög kortslutningseffekt krävs troligtvis utrustning för att minska belastningens asymmetri.¹³ Enligt (Trafikverket, 2014e) matas järnvägen från regionala nät med spänningsnivå upp till 130 kV. Därför räknas en SVC med syfte att minimera assymetrin in i anläggningskostnaderna på varje transformatorstation. Kostnaden för SVC:er uppskattas till 60 MSEK.¹⁴

I 25 kV-systemet står autotransformatorer på cirka var 7:e kilometer, vid AT-gränsen utanför transformatorstationerna, samt på respektive sida av sektionerinspunkter. Eftersom linjeströmmen med detta system inte överstiger 600 A (utifrån simulering) krävs enligt kapitel 3.3 endast en autotransformator vid AT-gränserna. Ovanstående gäller för både upp- och nedspår, vilket resulterar i ett behov av 60 stycken autotransformatorer.

Ytterligare anläggningskostnader för 25 kV-systemet uppkommer i samband med neutralsektioner i kopplingspunkterna med befintlig järnväg. I (Banverket, 2003) anges kostnaderna inom kontaktledning vid ombyggnad av neutralsektionen mellan Sverige och Danmark (se kapitel 3.2.2) till 3 MSEK. Neutralsektioner på Ostlänken måste dock konstrueras för att uppfylla TSD-kraven samtidigt som det krävs nybyggnad istället för ombyggnad. Kostnaden för respektive neutralsektion uppskattas till 5 MSEK. Tabell 8 sammanställer anläggningskostnader för 25 kV-systemet.

Tabell 8: Anläggningskostnader för 25 kV-systemet.

| Anlagd enhet | Antal (st) | Styckpris (MSEK) | Kostnad (MSEK) |
|--------------------------|------------|------------------|----------------|
| Transformator | 6 | 42,5 | 255 |
| Inkoppling | 4 | 6 | 24 |
| Autotransformator | 60 | 2 | 120 |
| SVC | 4 | 60 | 240 |
| Neutralsektion | 3 | 5 | 15 |
| Totalt | | | 654 |

¹² Skriftlig källa, kontakt via e-post: Tommy O Jensen, Atkins Global.

¹³ Ibid.

¹⁴ Ibid.

8.3 Underhållskostnader

Underhållskostnader för Sitras SFC Plus är svåråtkomliga eftersom de inte varit i drift särskilt länge. Som referens används därför istället omriktarmodellen MegaMacs. Dess årliga kostnad för förebyggande underhåll är cirka 50 000 SEK. Kostnaden för avhjälpande underhåll har varit cirka 30 000 SEK per år. Siffran för avhjälpande underhåll kan dock variera kraftigt vid till exempel havererande tyristorer eller dioder då dessa kostar 25 000 SEK per styck. Kostnaderna för Sitras SFC Plus antas bli något lägre än för MegaMacs till följd av deras konstruktionsskillnader.¹⁵ Årlig kostnad för underhåll av Sitras SFC Plus antas vara 80 000 SEK eftersom kostnaden för eventuella havererade komponenter förmodas vägas upp av lägre underhållskostnad i övrigt.

För en transformatorstation går 122 000 - 152 000 SEK varje år till inspektion av reläskydd, kopplingsanläggningar samt transformator. Till detta tillkommer kontroll och utbyte av komponenter cirka vart 10:e år vilket uppskattas kosta 244 000 - 366 000 SEK, det vill säga 24 000 - 37 000 SEK årligen.¹⁶ Den totala underhållskostnaden uppskattas därför till 189 000 SEK. Tabell 9 sammanställer underhållskostnader för elmatningsstationerna.

Tabell 9: Underhållskostnader för elmatningsstationerna.

| Underhållen enhet | Antal (st) | Kostnad (kr/år/st) | Kostnad över livslängd (MSEK) |
|----------------------|------------|--------------------|-------------------------------|
| Omriktare | 12 | 80 000 | 58 |
| Transformatorstation | 4 | 189 000 | 45 |

8.4 Kostnadssummering

Tabell 10 sammanställer samtliga kostnader som tagits upp i rapporten för att ge en översiktlig bild av den direkta ekonomiska skillnaden systemen emellan.

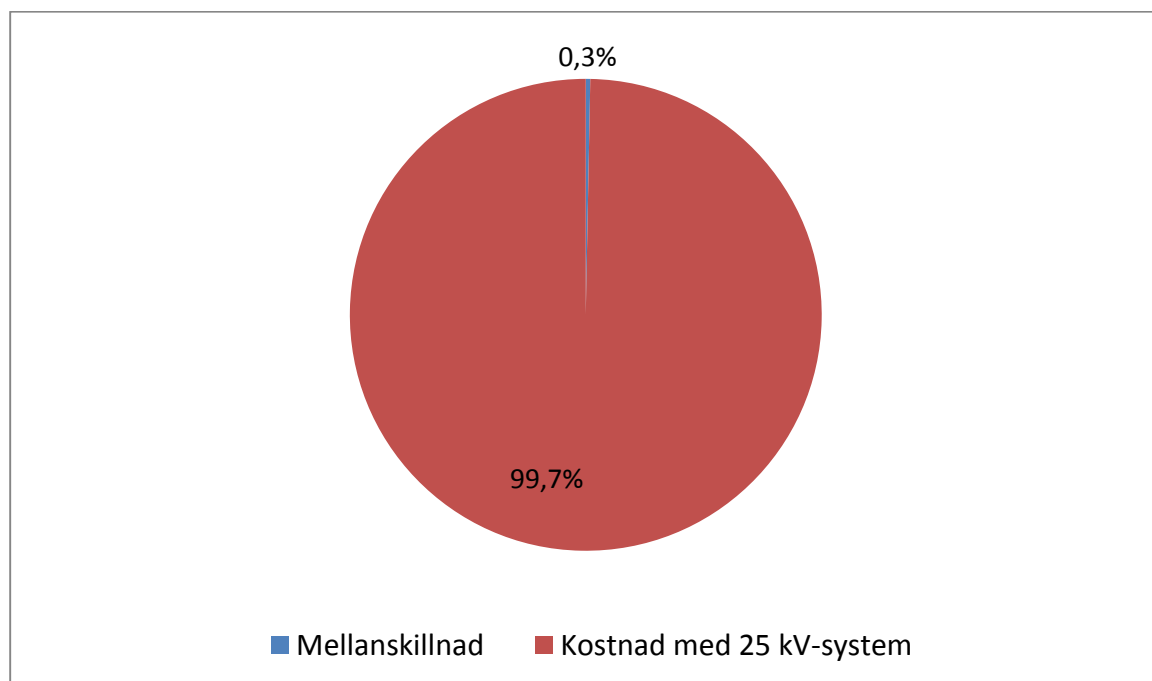
¹⁵ Skriftlig källa, kontakt via e-post: Roger Deremar, avdelning nationellt underhåll, infrasystem, Trafikverket.

¹⁶ Skriftlig källa, kontakt via e-post: Tommy O Jensen, Atkins Global.

Tabell 10: Sammanfattning av kostnader för respektive traktionssystem.

| Kostnadspost | Kostnad med 15 kV-system (MSEK) | Kostnad med 25 kV-system (MSEK) |
|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Energi | 11 910 | 12 337 |
| Anläggning | 1 108 | 654 |
| Underhåll | 58 | 45 |
| Summa | 13 076 | 13 036 |
| Besparing | - | 40 |

Besparingen sätts i proportion till studerade kostnader i figur 31, där hela cirkeldiagrammet motsvarar 15 kV-systemets studerade kostnader.



Figur 31: Besparingen i proportion till kostnader.

Besparingen om 40 MSEK utgör 0,3 % av 15 kV-systemets undersökta kostnader. Med hänsyn till hela Ostlänkenprojektets kostnad är skillnaden ytterligare mindre.

9 Diskussion

Dimensioneringen som ligger till grund för rapportens kostnadsberäkningar är kraftig i förhållande till dagens trafikering på sträckan Järna - Linköping. Med något sänkta dimensioneringskrav skulle pengar sparas in i ett tidigt skede. Möjligheten att bygga ut vid ökade behov bör dock beaktas eftersom framtida resandeutveckling aldrig kan förutspås med säkerhet.

I rapportens simuleringar har 400 meter långa höghastighetståg antagits som enda trafikeringstyp. I praktiken är det högst sannolikt att även andra typer av tåg för till exempel mer lokal trafik kommer trafikera Ostlänken. Dessutom bygger beräknad energiåtgång på efterföljande isolerade tåγκörningar. Flera sådana cykler är ej helt jämförbart med samtida trafikering av flera närliggande tåg. Ändå har denna metod använts, på grund av komplexiteten att simulera flera samtida tåg av olika typer på en dubbelspårsanläggning. Mer specificerad trafikering samt en mer komplex simuleringsmodell hade påverkat rapportens resultat.

De placeringar av elmatningsstationer som rapporten behandlar i kapitel 6.2 bedöms vara rimliga. Placeringarna påverkar kostnader för såväl energi som anläggning och underhåll. Större avstånd mellan elmatningsstationer medför högre impedanser och ger därför stor påverkan på energikostnaderna över anläggningens livslängd. Samtidigt kan anläggnings- och underhållskostnader minskas med exempelvis slopande av en elmatningsstation. Vidare utvärdering av antalet elmatningsstationer samt placeringen av dessa medför kostnadsoptimering och är därför nödvändigt oavsett traktionssystem.

En betydande andel av de energiförluster som finns i 15 kV-systemet beror på omriktning. I rapporten antas en modern typ av omriktare med verkningsgrad 98,6 % vilket är långt över vad omriktarna åstadkom för bara några år sedan. Samma utredning skulle då lett till en klar fördel till 25 kV-system ur effektivitetssynpunkt. När Ostlänken står klar år 2028 finns potentiellt ännu effektivare omriktare, vilket istället ger fördel för 15 kV-systemet. Omriktarens verkningsgrad är mycket viktig för hela traktionsnätets verkningsgrad.

I samtliga kostnadsberäkningar gällande energi har elpriset 60 öre / kWh antagits. Elpriset kan potentiellt fluktuera kraftigt över långa såväl som korta tidsperspektiv. Kostnadsberäkningen tar hänsyn till anläggningens livslängd om 60 år, och så långt fram i tiden kan hela energimarknaden vara annorlunda. Huruvida det innebär ökade eller minskade energikostnader relativt idag är svårt att utvärdera. Oavsett vilket skulle energikostnaderna över Ostlänkens livstid påverkas, och därmed även utfallet av rapportens resultat.

Rapporten tar inte upp någon samhällsekonomisk analys, vilket innebär att indirekta kostnader och vinster inte delges hänsyn. Ett exempel där detta spelar in är vid beräkning av återmatningens nytta. I 25 kV-systemet finns inte lika goda möjligheter för andra tåg att utnyttja återmatad energi. Dock skulle energin kunna utnyttjas i andra sammanhang efter återmatning till trefasnätet. Nyttan det ger värderas till 0 SEK trots att det egentligen skulle innebära en samhällsekonomisk vinst ur miljösynpunkt. Utöver det skulle även den direkta ekonomiska effekten vara mer positiv med 25 kV-systemet om avtal med elleverantörer som möjliggör rimlig ersättning för återmatad energi hade funnits.

Ytterligare ekonomiska poster som inte tagits hänsyn till gäller exempelvis de administrativa kostnader som omstruktureringar av förvaltning och personalutbildningar medför vid systembyte. Dessa kostnadsposter är svåra att uppskatta men antas vara av stor betydelse.

Den största fördelen med 25 kV-systemet är den högre systemspänningen som genererar lägre energiförluster. 15 kV-systemets sammankopplade nät ger stor nytta eftersom återmatad energi kan utnyttjas bättre, belastningen på trefasnätet är symmetrisk samt att överföringssystemets impedans är betydligt lägre till följd av dubbelmatning. Teoretiskt kan en kombination av de två traktionssystemens fördelar ge det mest effektiva traktionsnätet.

10 Slutsats

Överföringssystemet får med 25 kV-system högre impedans främst beroende på enkelmatning. Trots detta leder den högre systemspänningen till en ökad överföringseffektivitet som för med sig en besparing om 238 MSEK över 60 års drift, med elpriset 60 öre/kWh. Vidare konstateras att det sammankopplade traktionsnätet som 15 kV-systemet utgör medför en kraftigt ökad ekonomisk besparingspotential med hänsyn till återmatande broms. Fördelen för 15 kV-systemet genom återmatning beräknas till 664 MSEK, vilket gör att traktionssystemet medför en besparing inom energieffektivitet om 427 MSEK gentemot 25 kV-systemet.

Vidare uppskattas anläggningskostnaderna för 25 kV-systemet vara 454 MSEK lägre än för 15 kV-systemet. Även underhållskostnaderna är marginellt lägre med en besparing om 13 MSEK över 60 år.

Totalt sett skiljer sig utgifterna 40 MSEK över 60 år, till fördel för 25 kV-systemet. Skillnaden är i relation till projektets storlek marginell. Med beaktande gentemot osäkerheter i kalkylen, administrativa kostnader samt andra indirekta kostnader som tillkommer vid introduktion av ett nytt traktionssystem dras slutsatsen att 25 kV-systemet inte ger sådana fördelar att det rekommenderas.

10.1 Framtida studier

Möjliga sätt att utveckla studien är att genomföra mer komplexa simuleringar med samtida tågkörningar och flera trafiktyper. Även utredning av fler scenarion kring placering av omformarstationer och dess påverkan skulle behöva tas fram.

Det finns också många tekniska skillnader systemen emellan som inte behandlas i rapporten. Exempelvis skulle studier kring systemens inverkan på elektromagnetisk kompatibilitet behöva utföras.

De kostnader ett systembyte skulle innebära för tågoperatörer och för Trafikverket på grund av exempelvis omstruktureringar av förvaltning och personalutbildning behöver utredas.

11 Källförteckning

- ABB. (2010). *SVCs for load balancing and trackside voltage control High-Speed 1*. Hämtat från ABB:
[http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/c9f996d4f6c5c601c12570c9004b1754/\\$file/a02-0196%20e%20lr.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/c9f996d4f6c5c601c12570c9004b1754/$file/a02-0196%20e%20lr.pdf) den 14 Februari 2014
- Abrahamsson, L., Schütte, T., & Östlund, S. (2012). Use of converters for feeding AC railways for all frequencies. *Energy for Sustainable Development*, 368-378.
- Andersson, E., & Lukaszewicz, P. (2006). *Energy consumption and related air pollution for Scandinavian electric passenger trains*. Stockholm: KTH.
- Banverket. (2003). Projektbeskrivning, El-systemskifte Lernacken.
- Banverket. (2007). *BVS 543.10101 Parallellkoppling av kontaktledningssystem vid dubbelspår*. Hämtat från Trafikverket:
http://ida8iext.banverket.se/bvdok_extern/ViewPdfDoc.aspx?docGUID=4e3a9278-34ce-4c82-859f-365014108989 den 25 Mars 2014
- Banverket. (2009a). *BVS 1543.11601 Kraftförsörjningsanläggningar. Autotransformatorsystem - systembeskrivning*. Hämtat från Trafikverket:
http://ida8iext.banverket.se/bvdok_extern/ViewPdfDoc.aspx?docGUID=4cc9cbcf-3574-4c54-a708-71581e75dede den 14 Mars 2014
- Banverket. (2009b). *Järnvägsutredning Ostlänken. Ostlänken - bilagor till Gemensam del*. Hämtat från Trafikverket:
http://www.trafikverket.se/PageFiles/97223/9601-00-026_Bilaga%201-9%20till%20Gemensam%20del.pdf den 14 Februari 2014
- Biedermann, N. (2002). *Järnvägens elmatning*. Hämtat från Nth:
http://www.nth.se/nb/jvg_el.pdf den 13 Februari 2014
- Burlein, C., & Gruber, R. (Juni-Juli 2013). Dezentrale Umrichter mit neuer Umrichtertechnologie. *Elektrische Bahnen*, ss. 412-416.
- Büker, T. (2007). *Maps and facts on European interoperability issues*. Hämtat från Railways through Europe:
http://www.bueker.net/trainspotting/voltage_map_europe.php
- Copenhagen - Ringsted Team. (2013). *Evaluation of first power simulation*. Hämtat från Banedanmark:
<http://www.bane.dk/db/filarkiv/14513/Evaluation%20of%20first%20simulation.pdf> den 28 Mars 2014
- Delcan-Arup Joint Venture. (December 2010). *Conceptual Design of Electrification System*. Hämtat från Gotransit:
http://www.gotransit.com/electrification/en/current_study/Appendix%20Files/Appendix%207.pdf den 13 Februari 2014

- Europeiska kommissionen. (2013). *Trans-European Transport Network*. Hämtat från Europeiska kommissionen: http://ec.europa.eu/transport/infrastructure/tentec/tentec-portal/site/maps_upload/09_01_2014SchematicA0_EUcorridor_map_outlined.pdf den 17 Mars 2014
- Europeiska kommissionen. (2014). *Transeuropeiska transportnätet. Förbindelser till Sverige*. Hämtat från Europeiska kommissionen: <http://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure/ten-t-guidelines/doc/ten-t-country-fiches/merged-files/se.pdf> den 14 Mars 2014
- Godske, B. (2013). *Svensk kørestrømsekspert: 16 2/3 Hz holder 100 procent i dag*. Hämtat från Ingeniören: <http://ing.dk/artikel/svensk-koerestroemsekspert-16-23-hz-holder-100-procent-i-dag-157672> den 25 April 2014
- Goossens, H. (2010). *Maintenance of High Speed Lines*. Hämtat från UIC: <http://www.uic.org/download.php/publication/520E.pdf> den 8 April 2014
- Jiang, H. (2007). *Energidebitering för tåg*. Hämtat från Trafikverket: http://banportalen.banverket.se/Banportalen/upload/2274/Energidebitering_for_tag_2.pdf den 25 Mars 2014
- Järnvägsstyrelsen. (2008). *Swedish national rules for open points HS TSI ENE*. Hämtat från Transportstyrelsen: http://www.transportstyrelsen.se/Global/Jarnvag/TSD/Svenska/Open_points_2008-07-16_ENE_report_including_attach.pdf den 17 Mars 2014
- Nyköping kommun. (2013). *Ostlänken översiktskarta*. Hämtat från Nyköping kommun: http://nykoping.se/Global/Bilder/Bo_bygga_o_miljo/Stadsplanering_o_byggprojekt/Ostlanken/Oversiktskarta.jpg den 17 Mars 2013
- Näringsdepartementet. (2012). *Jobb- och tillväxtsatsningar: 55 miljarder till järnväg*. Hämtat från Regeringskansliet: <http://www.regeringen.se/content/1/c6/19/79/31/43432724.pdf> den 13 Februari 2014
- Oura, Y., Mochinaga, Y., & Nagasawa, H. (1998). *Railway Electric Power Feeding Systems*. Hämtat från JRTR: http://www.jrtr.net/jrtr16/pdf/f48_technology.pdf
- Reijm, M. (2006). *Lärobok Kontaktledning - Introduktion*. Hämtat från Trafikverket: http://www.trafikverket.se/PageFiles/38458/Larobok_kontaktledning_Introduktion.pdf den 14 Mars 2014
- Siemens. (2012a). *Eurostar e320 high-speed trains*. Hämtat från Siemens: <http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/en/rail-solutions/high-speed-and-intercity-trains/velaro/velaro-e320-en.pdf> den 25 Mars 2014

- Siemens. (2012b). *Sitras SFC Plus*. Hämtat från Siemens:
http://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/rail-electrification/ac-traction-power-supply/Documents/SFC%20Plus_PI_102_76.pdf den 17 Mars 2014
- SIKA. (2005). *Kalkylvärden och kalkylmetoder*. Hämtat från Trafikverket:
http://www.trafikverket.se/PageFiles/51331/asek_3_5_kalkylv%C3%A4rden_och_kalkylmetoder.pdf den 16 April 2014
- Städje, J. (2009). Fritt fram för frossa: svenska ellok! *IDG*. Hämtat från
<http://www.idg.se/2.1085/1.232899/ref=bjn208>
- Tiippana, E. (2010). *Power supply*. Hämtat från VR. den 28 April 2014
- Trafikverket. (2012). *Ostlänken*. Hämtat från Trafikverket:
<http://www.trafikverket.se/Privat/Projekt/Ostergotland/Ostlanken/> den 14 Februari 2014
- Trafikverket. (2013a). *Tekniska systemkrav Ostlänken*. Hämtat från Trafikverket:
http://www.trafikverket.se/PageFiles/144771/tekniska_systemkrav_ostlanken_arbetsmaterial.pdf den 14 Mars 2014
- Trafikverket. (2013b). *Produktivitetsprogram Kraftförsörjning*. Hämtat från Trafikverket:
http://www.trafikverket.se/PageFiles/142006/produktivitetsprogram_kraftforsorjningen.pdf den 12 Mars 2014
- Trafikverket. (2013c). *Höghastighetsbanor - Preliminär inriktning på val av system för traktionsmatning*. Hämtat från Trafikverket. den 28 April 2014
- Trafikverket. (2013d). *Järnvägens kapacitetsutnyttjande och kapacitetsbegränsningar 2013*. Hämtat från Trafikverket:
http://www.trafikverket.se/PageFiles/46897/rapport_kk_kb_2013_%2020140129_ny.pdf den 16 April 2014
- Trafikverket. (2014a). *Nya stambanor mellan Stockholm-Göteborg/Malmö*. Hämtat från Trafikverket:
http://www.trafikverket.se/PageFiles/150093/Nya_stambanor_140228_1.pdf den 17 Mars 2014
- Trafikverket. (2014b). *Övergripande krav, ny stambana*.
- Trafikverket. (2014c). *Trafikverkets elprisrapport Mars*. Hämtat från Trafikverket:
http://www.trafikverket.se/PageFiles/151056/elprisrapport_2014-03-27.pdf den 23 April 2014
- Trafikverket. (2014d). *Förstärkt kraftförsörjning*. Hämtat från Trafikverket:
<http://www.trafikverket.se/Privat/Projekt/Nationell-projekt/Forstarkt-kraftforsorjning/> den 16 Maj 2014
- Trafikverket. (2014e). *Järnvägens elanläggningar*. Hämtat från Trafikverket:
http://publikationswebbutik.vv.se/upload/7280/100696_Jarnvagens_elanlaggningar.pdf den 08 Maj 2014

- Trafikverket. (I). *Frågor och svar om Ostlänken*. Hämtat från Trafikverket:
<http://www.trafikverket.se/Privat/Projekt/Sodermanland/Ostlanken/Frag-or-och-svar-om-Ostlanken/> den 25 April 2014
- Trafikverket. (II). *Materialservice*. Hämtat från Trafikverket:
https://app.trafikverket.se/TRV_esa/esa/ItemDetails.jsp?@where.ItemID@EQ=0435015 den 6 Maj 2014
- UIC. (2002a). *Regenerative braking in 16,7 Hz, 15 kV systems*. Hämtat från Railway energy: <http://www.railway-energy.org/tfee/index.php?ID=220&TECHNOLOGYID=41&SEL=210&EXPANDALL=3> den 27 Mars 2014
- UIC. (2002b). *Regenerative braking in 50 Hz, 25 kV systems*. Hämtat från Railway energy: <http://www.railway-energy.org/tfee/index.php?ID=220&TECHNOLOGYID=104&SEL=210&EXPANDALL=3> den 27 Mars 2014
- White, R. D. (2013). *AC Railway Electrification System Design*. Hämtat från The Institution of Engineering and Technology:
<http://conferences.theiet.org/reis/past-presentations/2013/-documents/presentation-white.cfm> den 11 April 2014
- Östlund, S. (2012). *Electric Railway Traction*. Stockholm: KTH.