

Banmatningssystem för höghastighetsjärnvägar

Power supply systems for high speed railways

Niklas Biedermann

Examensarbete
Stockholm 2006

ISSN 1651-5633

TRITA-2IT Ex arb 2006:011

ISRN KTH/2IT/--SE



KTH Tillämpad
informationsteknik

Examensarbete
vid Institutionen för tillämpad IT

Thesis Project
at Department of Applied Information Technology

Banmatningssystem för höghastighetsjärnvägar

Power supply systems for high speed railways

Niklas Biedermann

Godkänt 2006-03-13	Examinator Sonny Wallgren	Underskrift
-----------------------	------------------------------	-------------

Handledare: Stefan Östlund, Institutionen för Elektrotekniska system, avdelningen för Elektriska maskiner och Effektelektronik.

Niklas Biedermann
nb@nth.se

Sammanfattning

Inom en inte allt för avlägsen framtid kommer det att köras tåg i Sverige i hastigheter över 250 km/h. Utomlands finns redan flera decenniers erfarenhet från sådan trafik. Rapporten innehåller dels en allmän beskrivning av banmatningssystem och en kortfattad redogörelse om hur banmatningssystemen är utförda i vissa utvalda länder.

I omkring 10 länder bedrivs i dagsläget järnvägstrafik i hastigheter över 250 km/h. Höghastighetsnätet och dess banmatning i Tyskland, Frankrike, Japan och Spanien beskrivs mer i detalj, dessa 4 länder har de största höghastighetsnäten och längst erfarenhet av att bedriva höghastighetstrafik. Förutom i Tyskland är banmatningen i alla länder utförd med nätfrekvens och 25 kV, de enda undantagen är kortare sträckor där höghastighetstrafiken ska kunna samsas med fordon för andra strömsystem. För att begränsa strömuttaget från kontaktledningen är dock, på dessa avsnitt med lägre spänningar, tågens effekt och därmed hastighet oftast begränsad.

Banmatningen i länderna skiljer sig mest i fråga om principen för återledning och matningsstationernas utförande, främst i fråga om inkopplingen till det matande nätet. Även matningens dimensionering skiljer sig; dels beroende på trafiken, dels även på olika tankegångar om redundans i matningsstationerna eller på grund av överdimensionerad utrustning för att uppnå en högre standardiseringsgrad. Osymmetrier i det matande trefasnätet kan generellt hållas tillräckligt låga utan kostsam kraftelektronik. Dock använder Japan med sin täta trafik och med en matning som ursprungligen dimensionerats för lägre belastning, kraftelektronik i större omfattning, både för att hålla spänningen i kontaktledningen och för att belasta trefasnätet symmetriskt.

Av samma anledning fick även AT-system och andra tekniker för återledning tidigt en stor utbredning i Japan till skillnad från till exempel det tämligen nybyggda spanska systemet, som av kostnadsskäl inte använder någon speciell utrustning för återledningen.

Rapporten visar att det kommande effektbehovet i Sverige är relativt lågt jämfört med systemen utomlands. Där är både tågtätheten högre och tågen längre än vad som planeras i trafikeringsalternativ för Sverige, i detta fall med Ostlänken som exempel.

Abstract

In a near future trains will operate in Sweden at speeds higher than 250 km/h. Other countries have already amassed decades of experience from such traffic. This report contains a general description of railway power supply systems together with characteristics of the power supply systems for high speed lines in some countries.

High speed railways with speeds above 250 km/h are now operating in about 10 countries. The high speed railway systems, and their power supply, in Germany, France, Japan and Spain are described in detail, as these four countries today have the largest high speed networks. Except in Germany, the high speed railways in these countries are supplied with 25 kV AC and the grid frequency of the respective national power grid, the only exceptions being on shorter sections of line where both high speed trains and other trains using other current systems are running on the same track. Due to current limitations on these sections with lower voltage the power of the trains is here usually restricted; thus the train speed is also lower.

The power supply in these countries is mainly distinguished as regards their feeding system, for example AT or BT feeding systems, the design of the substations and the connection of these to the three phase grid. The dimensioning of the system is also different, not only because of the power needed for running the trains but also due to considerations regarding either redundancy in the substations or over-dimensioned equipment due to standardization. Asymmetries in the feeding three phase grid can generally be kept sufficiently low without expensive power electronics. However, Japan, with her intense traffic and with a power feeding system which was dimensioned for a lower load, uses power electronics to a greater extent for controlling the voltage and to achieve a symmetric load on the three phase grid.

For the same reason, AT and other technologies for lowering the impedance of the feeding system were introduced at an early date. Unlike Japan, the relatively new Spanish high speed network does not, for cost reasons, use any special equipment for the return current.

This report shows that the expected power requirement in Sweden will be relatively low, as compared with the other high speed rail networks. Both train densities and train weights are higher than those planned for Sweden (in this case taking "Ostlänken" as an example).

Innehåll

1	Banmatningssystem för höghastighetsjärnvägar	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	1
1.3	Omfattning och avgränsning	1
1.4	Val av metodik	1
2	Höghastighetsjärnvägar	3
3	Banmatningssystem - Allmän teori och översikt	5
3.1	15 kV 16 2/3 Hz	6
3.1.1	Kraftverk	7
3.1.2	Omformare	8
3.1.3	Omriktare	9
3.2	25 kV 50 Hz	11
3.2.1	Transformering från 3-fas nätet	11
3.2.2	15 kV 16 2/3 Hz kontra 25 kV 50 Hz	13
3.3	Återledning	14
4	Översikt – Banmatningens utförande	19
5	Tyskland	23
5.1	Höghastighetstrafik	24
5.1.1	Nätets uppbyggnad	24
5.1.2	Banmatning	25
6	Frankrike	27
6.1	Höghastighetstrafik	28
6.1.1	Nätets uppbyggnad	28
6.1.2	Fordon	29
6.1.3	Banmatning	29
7	Japan	33
7.1	Höghastighetstrafik	34
7.1.1	Nätets uppbyggnad	35
7.1.2	Banmatning	35
8	Spanien	39
8.1	Höghastighetstrafik	40
8.1.1	Nätets uppbyggnad	41
8.1.2	Fordon	41
8.1.3	Banmatning	42
9	Sverige	45
9.1.1	Jämförelse med sträckorna Stockholm-Göteborg/Malmö	45
9.1.2	Uppskattning av effektåtgång för Ostlänken	47
9.1.3	Beräkningsmodell	47
9.2	Slutsats	48
10	Källor	49
10.1	Tryckta källor	49
10.2	Webbkällor	51
10.3	E-post eller muntliga källor	52
10.4	Övriga källor	52

1 Banmatningssystem för höghastighetsjärnvägar

Arbetet består av allmän teknisk beskrivning av banmatningssystem, en internationell studie av befintliga matningssystem och en enkel uppskattning av effektbehovet för Ostlänken i Sverige.

1.1 Bakgrund

Det bedrivs studier om hur ett framtida järnvägsnät för höghastighetståg i Sverige skulle kunna se ut. I dessa studier undersöks möjliga sträckningar och trafikeringsalternativ. Även möjliga fordonstyper/koncept studeras. Det bedrivs även delprojekt där utformning av detaljer undersöks.

En samlad studie av banmatning och effektförbrukning vid givna trafikeringsalternativ har hittills inte gjorts.

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är att redovisa hur banmatningssystem för höghastighetsjärnvägar är uppbyggda och hur de är dimensionerade samt att ge en överskådlig kunskapsbas i området för att förenkla fortsatta studier i ämnet.

1.3 Omfattning och avgränsning

En kortfattad teoretisk beskrivning av banmatningssystem ges. Vidare ges en översikt över höghastighetsjärnvägar. Utförandet av banmatningssystemet för de tyska, franska och spanska och japanska höghastighetsjärnvägarna studeras. Även svensk banmatning beskrivs. En generell överblick av banmatningssystemet ges, därefter studeras de faktorer som är specifika för höghastighetsjärnvägarna och motiven för valda lösningar redovisas. Speciell vikt fästs vid effektbehov och därmed förenade faktorer. Även kostnader för systemen undersöks.

Arbetet kommer endast att beröra banmatningsstationer och effekttåg, kontaktledning kommer inte att beröras alls. Vidare kommer fordon inte att behandlas mer än vad som är direkt nödvändigt för förståelsen av den valda tekniken.

1.4 Val av metodik

I syfte att få en bred överblick över banmatningssystem i de fyra valda länderna samt i Sverige har tillgänglig litteratur på området inventerats. Informationen kompletterades med frågor till experter på området. Med en enkel beräkningsmodell uppskattades effektbehovet för Ostlänken.

2 Höghastighetsjärnvägar

Höghastighetsjärnväg är ett allmänt använt begrepp men utan klar definition.

Europeiska unionen definierar höghastighetsjärnväg och höghastighetståg såsom:

”Särskilda banor för hastigheter från 250 km/h och uppåt.”¹ och ”Tåg konstruerade för hastigheter från 250 km/h och uppåt.”² En liknande definition är: ”Höghastighetstågen har sth [största tillåtna hastighet] nivåer om 250 – 350 km/tim och de fodrar ny bana för att kunna köra så fort.”³

Enligt definitionen att ett höghastighetsnät består av särskilda banor som trafikeras av särskilda tåg i hastigheter över 250 km/h finns eller planeras höghastighetsjärnvägar enligt nedanstående tabell i världen.

Land	Namn	Hastighet [km/h] ⁴	Startår ⁵
Japan	Shinkansen	320	1964
Frankrike	TGV	320	1981
Italien	ETR 500	250-300	1981-2006 ⁶
Tyskland	ICE	300-330	1991
Spanien	AVE / Velaro	330	1992
Belgien	TGV, ICE, Thalys	300-330	1998 ⁷
Storbritannien	CTRL Eurostar	300	2003-2007
Korea	KTX	300	2004-2008
Taiwan		300	2005
Holland	HSL-Zuid	300	2007
China		250-300	2008-2010
Ryssland	Sokol	300	~2010

Tabell 1. Världens höghastighetsjärnvägar

Hastigheten är den högsta hastigheten som körs planmässigt i respektive land.

Det finns fler sträckningar som är byggda för 250 km/tim eller enkelt kan uppgraderas till detta, dock rör det sig vanligtvis om enskilda avsnitt där banan i förberedande syfte projekterades för högre hastigheter. Exempelvis finns det sträckor i USA byggda för 265 km/h men som endast trafikeras i 240 km/h.

I Holland finns planer på höghastighetsjärnvägar ”HSL Zuid”, men de är fortfarande på ett mycket tidigt stadium.

Japan var pionjärer inom höghastighetstrafiken med Shinkansen, något decennium senare startade Frankrike sin TGV-trafik. Båda systemen har uppfyllt förväntningarna med råge och byggs alltjämnt ut i tämligen rask takt. Tågen går tätt och är välfyllda och har blivit en stark konkurrent till inrikesflyget.

¹ Rådets direktiv 96/48/EG Bilaga 1, §1.b.

² Rådets direktiv 96/48/EG Bilaga 1, §2.

³ Fröjd, 2003, sid 157.

⁴ Avser högsta hastighet i daglig trafik idag eller planerad hastighet när nätet öppnas eller slutförs.

⁵ Avser när kommersiella trafiken började eller är planerad att börja. Andra årtalet avser när det i dagsläget planerade nätet tas i drift i sin helhet. Olika källor anger olika siffror beroende på olika definitioner av höghastighetstrafik.

⁶ UIC, 2005, *High speed*, sid. 19.

⁷ UIC, 2005, *High speed*, sid. 19.

3 Banmatningssystem - Allmän teori och översikt

Tidigt började elektricitet användas för att driva tåg, det var ett ekonomiskt alternativ till ångdriften, framförallt i de länder som hade gott om vattenkraft. Elektrifieringen var visserligen kapitalintensiv men i gengäld var driftskostnaderna lägre. Idag är eldrift det självklara valet för sträckor med tät trafik och höga hastigheter. Eldriften ger även möjlighet att bygga mycket kompakta fordon med hög effekt till skillnad från utrymmeskrävande dieselmotorer.

De första banorna var små industribanor som drevs med likspänning, även spårvägar och andra järnvägar med begränsade spårssystem elektrifierades tidigt. Likspänningen begränsade överföringen till korta avstånd och relativt låg effekt. Man var dock tvungen att använda likspänning eller matning med trefas som krävde komplicerade kontaktledningar och var svår att reglera, då man inte kunde bygga tillräckligt stora enfasmotorer. 1903 utvecklade Maschinenfabrik Oerlikon i Schweiz en princip för att kunna driva större kommutatormotorer med växelström. Dock var man tvungen att använda en låg frekvens för att kunna säkerställa en god kommutering.

För att kunna använda en högre frekvens var man tvungen att likrikta kontaktledningsspänningen på loket. Redan på 1920-talet byggdes de första loken för 50 Hz men först på mitten av 1930-talet experimenterade tyskarna med lok för frekvensen 50 Hz och kvicksilverlikriktare på loket. Bäst visade sig lok med styrda kvicksilverlikriktare vara. Efter andra världskriget fortsatte fransmännen försöken och på 1950-talet slog elektrifieringen med 25 kV 50 Hz igenom kommersiellt.⁸⁹

Idag förekommer i princip 3 olika grundläggande strömsystem för banmatning:

- Likspänning
- Växelspänning med annan frekvens än industrifrekvensen
- Växelspänning med samma frekvens som industrifrekvensen

De vanligaste strömsystemen är 25 kV 50 Hz, 3 kV DC och 15 kV 16 2/3 Hz.

För höghastighetsbanor förekommer två system, 15 kV 16 2/3 Hz och 25 kV 50 Hz eller 60 Hz. På kortare avsnitt kan till exempel 3 kV likspänning förekomma, men med lägre effekt, detta lämnas därför därhän.

EU har fattat beslut om en teknisk specifikation för driftskompatibilitet för energiförsörjningen hos det transeuropeiska järnvägssystem för höghastighetståg. I specifikationen regleras vilka krav banmatningssystemet ska uppfylla, hur kontaktledningen ska vara beskaffad med mera. Till exempel ställs också krav på att effektfaktorn för tåg som är konstruerade för en driftskompatibel linje måste vara 0,95 eller större om tågets effekt överstiger 6 MW¹⁰. Maximalt tillåten ström till ett tåg vid DC 3 kV är 4 kA, vid AC 15 kV 16,7 Hz 1,7 kA och vid AC 25 kV 50 Hz 1,5 kA. Dessa siffror avser höghastighetslinjer.¹¹

⁸ Östlund, Stefan, 2002, sid. 5.

⁹ Steimel, Andreas, 2004 sid. 5.

¹⁰ Kommissionens beslut 2002/733/EG sid 56.

¹¹ Kommissionens beslut 2002/733/EG sid 74.

För banmatningens spänningar och frekvenser fastställs följande:

Spänning och frekvens	Linjekategori		
	Anslutande linjer	Uppgraderade linjer	Höghastighetslinjer
AC 25 kV 50 Hz	X	X	X
AC 15 kV 16,7 Hz	X	X	(1)
DC 3 kV	X	X	(2)
DC 1,5 kV	X	X	-

Tabell 2. Spänningar och frekvenser¹²

(1) I länder vilkas järnvägsnät för närvarande är elektrifierade med AC 15 kV 16,7 Hz, kan detta system användas för nyanlagda linjer. Samma system kan även användas i angränsande länder när så är ekonomiskt försvarligt.

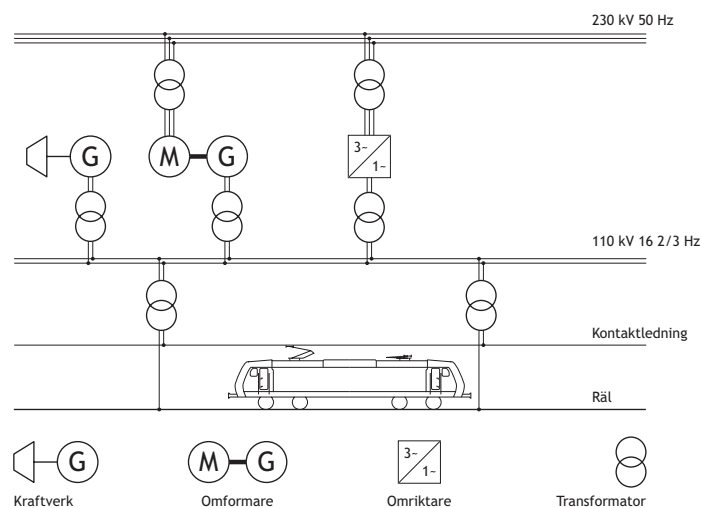
(2) Försörjningen med DC 3 kV kan användas i Italien och Spanien för befintliga linjer och nya linjeavsnitt som trafikeras i 250 km/tim när elektrifiering med AC 25 kV 50 Hz kan skapa risk för störningar av mark- och fordonsbaserad signalutrustning på en befintlig linje som finns nära den nya linjen.

3.1 15 kV 16 2/3 Hz

Det enda tidiga växelströmssystem som kom att överleva i större skala var 15 kV 16 2/3 Hz då det även uppfyller dagens krav på ett banmatningssystem. Spänningen förekommer främst i Europa, de största näten finns i Tyskland och Sverige.

Industrifrekvensen omformas till 16 2/3 Hz antingen via omformare eller statiska omriktare alternativt genereras i kraftverk med 16 2/3 Hz generatorer. Det senare var framförallt vanligt i elektrifieringens barndom och förekommer fortfarande i stor utsträckning i Tyskland.

Omformarstationerna kan sedan direkt mata kontaktledningen eller mata ett lågfrekvent högspänningsnät.



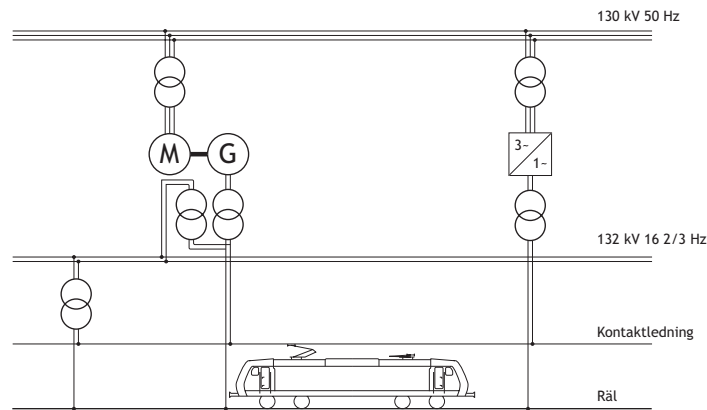
Figur 1. Översikt 16 2/3 Hz banmatning, exempel Tyskland

I Tyskland, Österrike och Schweiz finns ett tvåfas 110 kV 16 2/3 Hz nät som via transformatorstationer matar kontaktledningen. Spänningen mellan fas och jord är 55 kV, huvudspänningen är 110 kV.¹³

Kraftverk, omformarstationer eller omriktarstationer genererar 110 kV 16 2/3 Hz som distribueras till transformatorstationer via järnvägens 110 kV nät.

¹² Kommissionens beslut 2002/733/EG sid 10.

¹³ Schaffer, Heinz-Herbert, 1967, sid. 41 och sid. 124-127.



Figur 2. Översikt 16 2/3 Hz banmatning, exempel Sverige

Även i Sverige används ett tvåfas 132 kV 16 2/3 Hz nät med direktjordad nollpunkt och fasspänningen 66 kV, huvudspänningen är 132 kV¹⁴. Nätet förbinder en omformarstation och vissa omriktarstationer och matar kontaktledningen via transformatorer. Dock har tyska och svenska näten grundläggande skillnader, det Svenska 132 kV nätet är synkroniserat med det nationella 50 Hz nätet. Det tyska 110 kV nätet är asynkront med det nationella 50 Hz nätet vilket medför att det är ett helt eget fristående elnät som behöver samma effekt- och frekvensreglering som det nationella 50 Hz nätet också behöver¹⁵. Vidare finns ingen matningsstation som endast är ansluten till det svenska 132 kV matarledningssystemet, någon direktgenerering förekommer inte heller¹⁶.

I framförallt Sverige men även i Tyskland förekommer också synkrona omformare som inte är kopplade till ett lågfrekvent matarnät utan matar kontaktledningen direkt.

Strömmen genereras antingen i egna kraftverk med 16 2/3 Hz generatorer eller omformas eller omriktas från nationella 50 Hz nätet.

3.1.1 Kraftverk

I många länder, både med 16 2/3 Hz och med 50 Hz kontaktledningsfrekvens, har järnvägen av främst historiska skäl egna kraftverk som täcker en del av järnvägens energibehov. Omfattningen varierar, i Tyskland genereras mer än hälften av elenergin järnvägen förbrukar i egna kraftverk. Beroende hur landets naturtillgångar ser ut varierar även kraftverkstyperna. I Frankrike har t.ex. järnvägen många egna vattenkraftverk, i Tyskland står i stället kolkraftverk för den största delen av energibehovet. Vanligt förekommande är att järnvägen har generatorer i kraftverk som även producerar 50 Hz, på så sätt blir kraftverken större och kan utnyttjas effektivare. I Tyskland har järnvägen även en 16 2/3 Hz generator i kärnkraftverket Neckarwestheim, med sina 152 MW/ 187,5 MVA är det världens största 16 2/3 Hz generator¹⁷.

Generering i egna kraftverk gör att man slipper omformningen. Det kan vara fördelaktigt för att täcka basbehovet av kraft men för att kraftverken ska kunna bli tillräckligt stora enheter bör de vara ansluta till ett lågfrekvent matarledningssystem. I Tyskland har ekonomin för de egna kraftverken blivit relativt sett sämre i och med att priset för omriktare har minskat och driftsäkerheten ökat. Detta har även medfört att utbyggnaden av egna generatorer i kraftverk upphörde.

¹⁴ Friman, Edward, 2005, sid. 11.

¹⁵ Steimel, Andreas, 2004, sid. 235.

¹⁶ Friman, Edward, 2005, sid. 11.

¹⁷ König, Ulrich, 2004, sid. 11.

I Frankrike där järnvägen tillgodoser en del av sitt energibehov med egna vattenkraftverk står sig dessa betydligt bättre i jämförelse med att köpa elektriciteten från det allmänna nätet eftersom kostnaderna för genereringen av elektriciteten i vattenkraftverk är mycket låga. Då kraftverken är 50 Hz kraftverk är de anslutna till det nationella elnätet och är på så sätt inte beroende av att järnvägen behöver energin just för tillfället.

3.1.2 Omformare

Omformare består av en trefasmotor som driver en 16 2/3 Hz enfasgenerator. Omformarna var anledningen till att just frekvensen 16 2/3 Hz slog igenom eftersom det är 1/3 av 50 Hz. Poltalsförhållandet mellan motor och generator blir därmed 3:1, vanligtvis tolvpoliga motorer och fyrapoliga generatorer. Om kontaktledningsnätet är synkront med det nationella elnätet består omformaren av både en synkronmotor och en synkrogenerator. I Tyskland, där nätet är asynkront, är det en tolvpolig släpningad asynkronmotor som driver en fyrapolig synkronmotor.

Omformare förekommer i många olika storlekar och utföranden. Mindre omformare är ofta mobila för att kunna flyttas på järnväg. En av anledningarna är att omformarstationerna kan utföras enklare eftersom de inte behöver utrustning för att lyfta delar av de tunga aggregaten vid revisioner, till exempel väger en (öst)tysk flyttbar 10 MVA omformare 143,5 ton¹⁸. En annan fördel är att omformare enkelt kan skiftas när ett aggregat måste revideras, på det sättet behövs en lägre redundans än vad som skulle behövas om aggregaten vore fasta. Även möjligheten att kunna flytta aggregaten i krigstid var en anledning till att göra de svenska omformarna mobila.

De minsta aggregaten i Sverige har idag 3,2 MVA, de största 10 MVA. I Tyskland finns stationära omformare med upp till 80 MVA, dessa är anslutna till matarledningsnätet.

De roterande omformarna har vissa fördelar gentemot statiska omriktare: En egenskap är att det matande nätet är helt skilt från kontaktledningsnätet. Detta gör att störningar i princip inte överförs alls. Rotorns stora massa för också med sig att plötsliga variationer i belastningen inte fortplantas till matningen. Nackdelen med rotorns stora rörelseenergi är att omformaren tar några minuter att starta och stoppa. Genom att omformaren drivs av en trefasmotor blir belastningen på trefasnätet helt symmetrisk. Spänningsfall kan kompenseras genom att synkronmotorn producerar reaktiv effekt.

Roterande omformare har en mycket god överbelastningsförmåga, även under förhållandevis lång tid. Deras driftsäkerhet är mycket hög och fel är ovanliga. Till skillnad från de statiska omriktarna är de också okänsliga för transienter och andra störningar.

Nackdelen är att omformarna kräver periodiskt underhåll för vilket de måste stängas av. Verkningsgraden är något sämre än för omriktare, ca 88 % mot 94 %, detta bland annat beroende på att verkningsgraden blir sämre när omformarna inte går på full belastning. Verkningsgraden har dock förbättrats genom att minimera ”tomgången”. Med hjälp av datorer görs automatiskt prognoser som uppskattar hur mycket effekt som behövs och då startar upp respektive stoppar omformare vid behov. Alla omformare kan i princip återmata energi till trefasnätet.¹⁹

I Tyskland nybyggdes roterande omformare fram till slutet av 1980-talet²⁰, i Sverige tillverkades den sista omformaren 1978. Däremot byggs fortfarande omformarstationer för

¹⁸ Steimel, Andreas, 2004 sid. 242.

¹⁹ De två föregående styckena baserar på samtal med Greger Jansson. Styckena avser erfarenheter från Sverige men torde vara allmängiltiga.

²⁰ Linder, Heinze, 2002 sid. 449.

befintliga roterande omformare, 2003 togs en omformarstation i Emmaboda i drift och den senaste, med plats för 4 omformare, färdigställdes hösten 2005 i Mjölby. Den senaste omriktarstationen byggdes 1999 i Olskroken, Göteborg.²¹

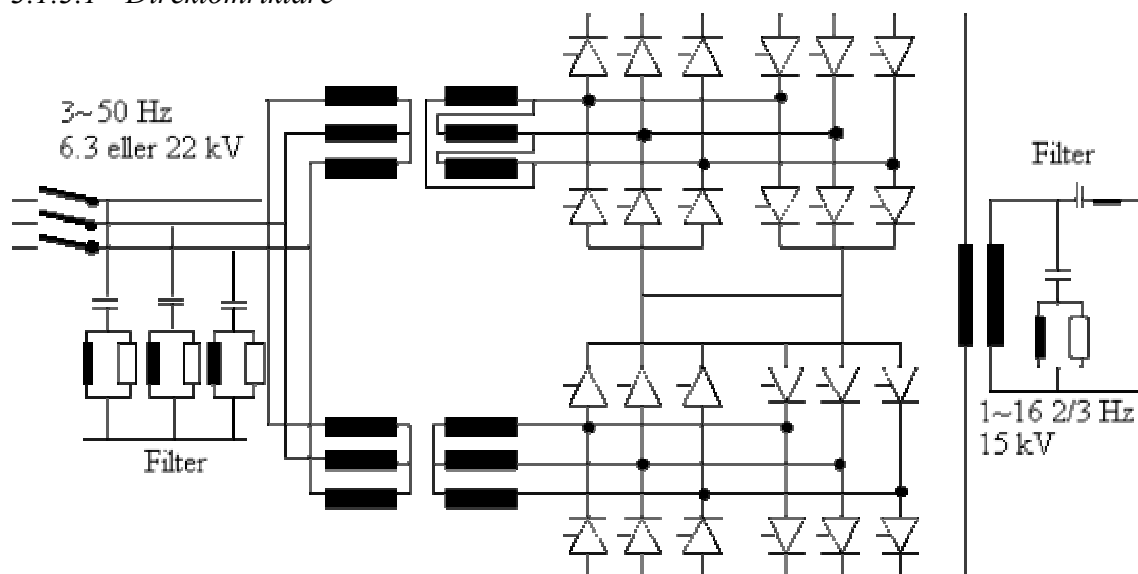
3.1.3 Omriktare

För att slippa de roterande maskinerna i omformarna började man redan tidigt leta efter alternativ. 1936 togs en omriktare med kvicksilverventiler i bruk i Basel. Sverige och ASEA var pionjär på omriktartekniken, 1972 togs den första direktomriktaren i drift. Idag har dessa till stor del avlösts av de självkommuterade växelriktarna vid nyinstallationer.

Generellt kännetecknas omriktare av en hög verkningsgrad, snabba start- och stopptider och hög tillgänglighet då de inte kräver underhåll på samma sätt som omformare. Omriktarstationerna kan utföras enklare, det krävs inga lyftanordningar eller kraftiga fundament och omriktaren är mindre och dess fysiska uppbyggnad kan enklare anpassas till byggnaden. Däremot är det ingen större skillnad i anskaffnings- eller underhållskostnader mellan omriktare och omformare.²² Till skillnad från omformare som klarar överbelastning med tiotals procent under flera minuter kan statiska omriktare inte överbelastas alls. Därför måste omriktaren dimensioneras efter den maximala belastningen medan transformatorerna dimensioneras för märkeffekten.²³

Nedan en kort översikt över omriktarnas kännetecken i banmatningssammanhang, för mer detaljerad information hänvisas till *Elektrisk Traktion* av Stefan Östlund²⁴ eller litteratur om effektelektronik.

3.1.3.1 Direktomriktare



Figur 3. Matningstation med direktomriktare²⁵

Direktomriktarna förekommer huvudsakligen i Sverige. De kännetecknas av en enkel uppbyggnad, hög driftsäkerhet och hög verkningsgrad. Med få effekthalvledare förbinder direktomriktare enfasnätet direkt med trefasnätet, några komponenter för energilagring i själva omriktaren som tar upp 33 1/3 Hz effektpulsationerna från enfasnätet förekommer inte.

²¹ Jansson, Greger, 2005.

²² Jansson, Greger, 2005.

²³ Lönard, Detlef mfl, 1995, sid. 182.

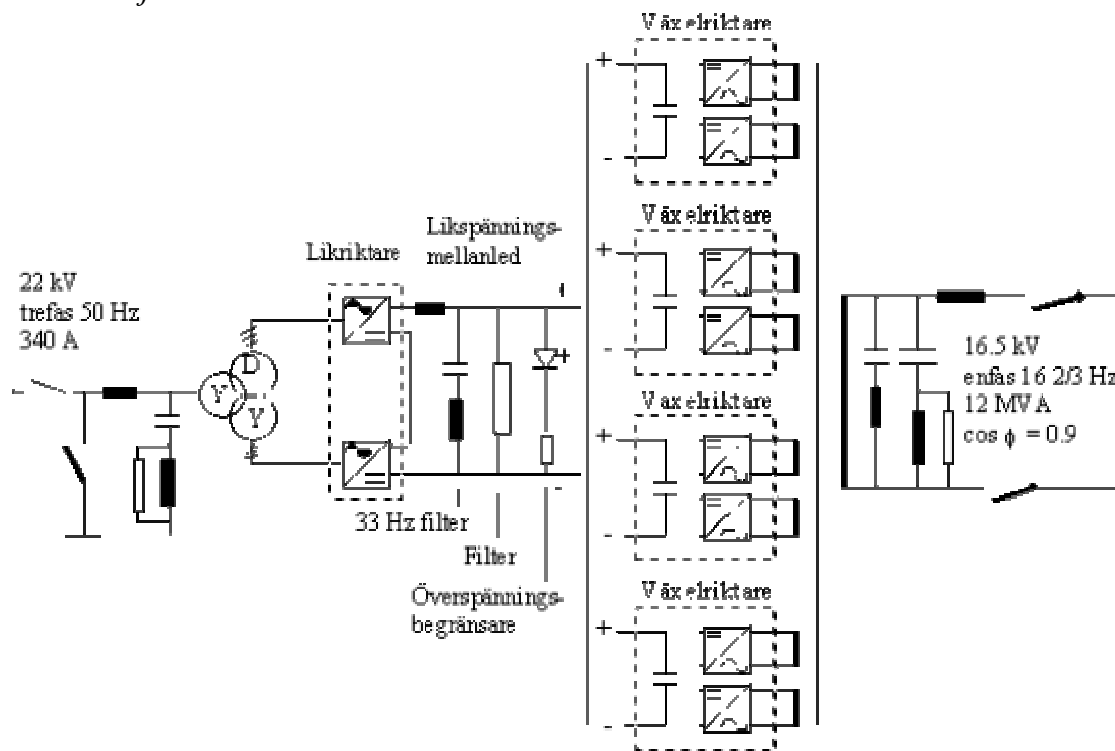
²⁴ Östlund, Stefan, 2002, sid. 168-171.

²⁵ Östlund, Stefan, 2002, sid. 170.

Nackdelen med direktomriktaren är att övertoner överförs direkt till det andra nätet, för att motverka detta används filter. Omriktaren konsumerar även mycket reaktiv effekt, denna måste produceras med filter på primärsidan.

Direktomriktare kräver också ett förhållandevis starkt matande nät. Eftersom det matande nätet deltar i omriktarens kommuteringsförlopp är de endast lämpliga att använda då det nationella 50 Hz nätet är synkront med 16 2/3 Hz nätet, detta är en av anledningarna varför direktomriktare inte används i Tyskland.

3.1.3.2 Självkommuterad växelriktare



Figur 4. Matningstation med självkommuterad växelriktare²⁶

1984 togs den första självkommuterade växelriktaren i bruk i Ånge, även här var ASEA de första som lanserade tekniken. I princip är det samma typ av omriktare som används som traktionsomriktare för drivning av asynkronmotorlok, bara att den omvandlar en lågfrekvent växelspanning till trefas i det fallet. Omriktaren består av en likriktare och en växelriktare, likspänningsmellanledet gör att det inte finns någon synkron koppling mellan primär och sekundärsidan. Av den anledning kallas växelriktaren också mellanledsomriktare.

Mellanledsomriktaren har en liten reaktiv effektförbrukning och ställer inga speciella krav på det matande nätet med avseende på kortslutningseffekt. Dock är den känslig mot överströmmar.²⁷ Den självkommuterade växelriktaren kan både generera och konsumera reaktiv effekt.

I Tyskland har man tagit fram en standardomriktare på 18,75 MVA/15 MW i två varianter av antingen Alstom eller ABB som är enhetligt uppbyggda i containrar för att hålla kostnaderna låga och förenkla reservdelshållningen. Dessa omriktare parallellkopplas sedan i större grupper, till exempel planeras omriktarstationen i Limburg att bestå av 8 omriktare när den är

²⁶ Östlund, Stefan, 2002, sid. 171.

²⁷ Östlund, Stefan, 2002, sid. 171.

fullt utbyggd. På bara 16 månader planerings- och byggtid färdigställdes första etappen om totalt 112,5 MVA/90 MW.²⁸

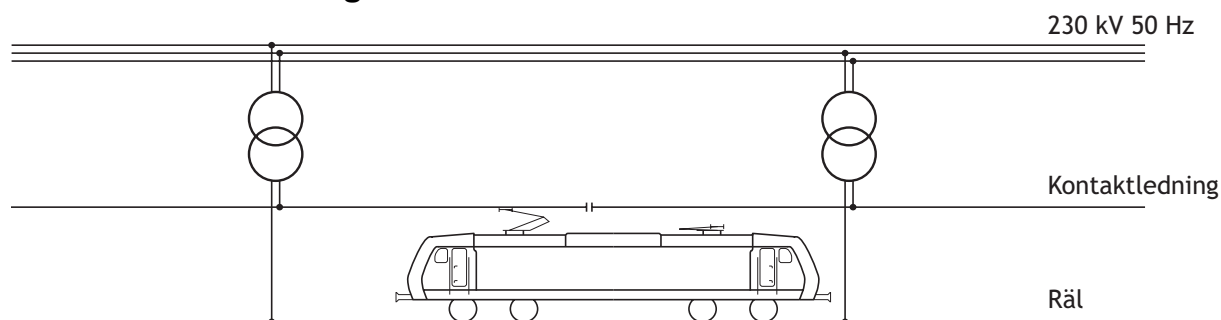
En utförligare beskrivning av växelriktares egenskaper för banmatning finns i artikeln *Statische Bahnstromumrichter – Systemübersicht ausgeführter Anlagen*²⁹.

3.2 25 kV 50 Hz

I nyare system där landet antingen inte varit elektrifierat eller elektrifierat med en lägre spänning används genomgående 25 kV med industrifrekvens 50 Hz utom Japan där även 60 Hz förekommer då utrustning importerades från USA när landet elektrifierades.

Det vanliga är att kontaktledningsspänningen produceras genom direkt transformering från trefasnätet. Dock kan även omriktare eller omformare användas om det finns höga krav på att belastningen på trefasnätet måste vara symmetrisk. Även synkronmaskiner kan användas för att symmetrera trefasnätet³⁰. Att järnvägsförvaltningen har egna kraftverk förekommer också, vanligtvis handlar det om vanliga kraftverk med trefasgeneratorer som antingen matar de egna transformatorstationerna direkt eller matar det nationella 50 Hz nätet och energin som järnvägen förbrukar räknas av mot energin som järnvägens kraftverk genererar.

3.2.1 Transformerering från 3-fas nätet³¹



Figur 5. Banmatning med industrifrekvens

Det i särklass vanligaste är att inkommande 3-fas spänning transformeras ned till lämplig spänning för järnvägsnätet. För att minska problem med osymmetrisk belastning av det matande nätet, använder man sig av olika transformatorkopplingar.

Följande transformatorkopplingar är de mest frekvent förekommande, men även andra varianter för symmetrering förekommer³².

- Enfas anslutning
- V-anslutning
- Scott-anslutning

Eftersom det vanligtvis är fasskiften mellan varje transformatorstation på grund av att transformatorerna ansluts till olika faser måste kontaktledningen mellan två transformatorstationer vara åtskild av en nollspänningssektion, till skillnad från 16 2/3 Hz kan alltså ett kontaktledningsavsnitt endast matas enkelsidigt om inte transformatorerna i angränsande stationer ansluts till samma faser.

²⁸ Schmidt, Rainer, 2003.

²⁹ Lönard, Detlef mfl, 1995, sid. 179-190.

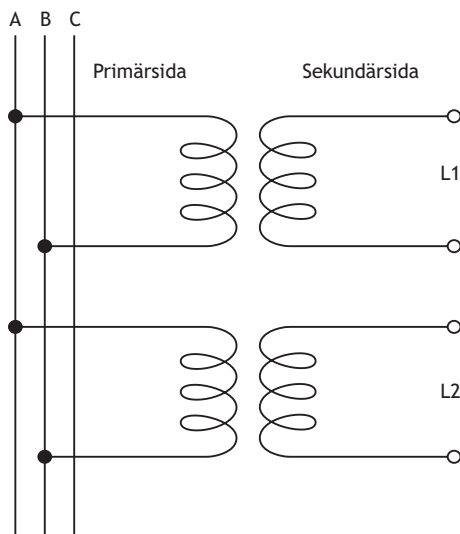
³⁰ Gutt, H.-J. 1991, sid. 79.

³¹ Avsnittet bygger på Chen, T.H. 1995, om inte annat är angivet.

³² Oura, Yasu, 1998, sid. 51.

I figurerna nedan är A, B, C faserna i trefasnätet. L1 och L2 är kontaktledningens strömkretsar. L1 matar åt ena hållet till sektionspunkten och L2 matar åt andra hållet.

3.2.1.1 Enfas anslutning

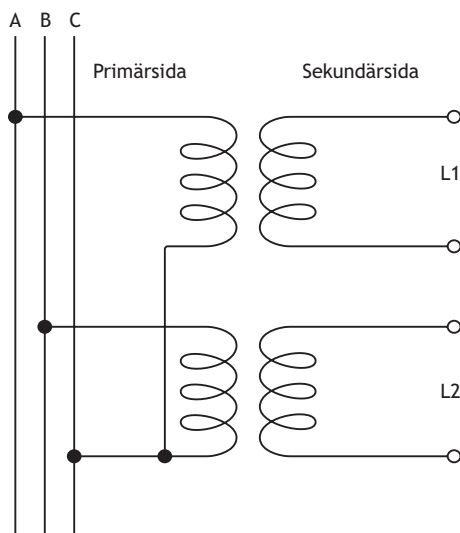


Figur 6. Enfas anslutning

Enfasanslutningen är den enklaste varianten. Transformatorn kopplas mellan två faser i det matande nätet. Transformatorstationen kan klara sig med en enda transformator.

Osymmetrin blir hög då endast två faser belastas. Fördelen är att dubbelsidig matning är möjlig. För glest trafikerade sträckor där effektbehovet är lågt är detta ett alternativ. Även om det matande nätet är mycket starkt kan denna variant väljas för att hålla nere investeringskostnaderna i transformatorstationerna.

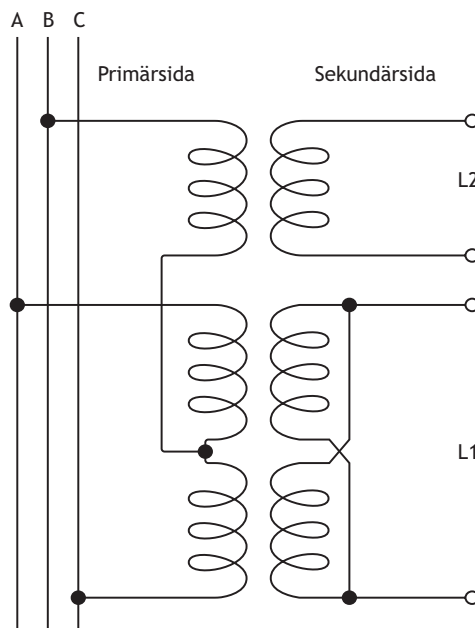
3.2.1.2 V-anslutning



Figur 7. V-anslutning

För bättre symmetrering används två transformatorer i varje transformatorstation som kopplas cykliskt till de olika faserna. Transformatorerna matar då ett kontaktledningsavsnitt vardera. Belastningen bör vara så jämnt fördelad mellan kontaktledningsavsnitten som möjligt, det vill säga att trafiken är så tät att det alltid finns minst ett tåg på varje avsnitt.

3.2.1.3 Scott-anlutning



Figur 8. Scott-anlutning³³

Den mest symmetriska belastningen på trefasnätet ger Scott-kopplingen. Första transformatorn, L1 benämns huvudtransformator och den andra teaser-transformator.

Observera att figuren inte anger något förhållande mellan lindningsvarven i transformatorerna.

Scott-kopplingens nackdel är att den kräver mer komplicerade transformatorer vilket medför högre investeringskostnader i matningsstationerna.

3.2.2 15 kV 16 2/3 Hz kontra 25 kV 50 Hz³⁴

Nyelektrifieringar av system som inte har kontakt med ett 15 kV 16 2/3 Hz har hittills uteslutande skett med 25 kV 50 Hz. Systemet uppvisar en rad fördelar, framförallt att transformatorstationer är enklare och billigare att bygga och att underhålla än omriktarstationer, även om det är långt ifrån oomtvistat att 25 kV 50 Hz är självklara valet, framförallt Tyskland framhåller gärna fördelarna med 16 2/3 Hz.

Kontaktledningssystem kännetecknas av hög impedans vilket gör att spänningsfallet vid 25 kV 50 Hz blir högre per längdenhet än med 15 kV 16 2/3 Hz. Ofta är transformatorstationerna placerade lika tätt i ett 50 Hz system som omriktarstationerna i ett 16 2/3 Hz system, transformatorstationerna kostar dock mindre än omriktarstationer. Fördelen gentemot 16 2/3 Hz är att man slipper omriktare eller omformare, detta dock på bekostnad av snedbelastningar av det matande trefasnätet vilket kräver starka nät. För att minska snedbelastningarna skiftas faserna vid varje transformatorstation, det medför att kontaktledningen inte kan matas från två håll utan måste vara sektionerad mellan alla matningsstationer. Detta i kombination med det högre spänningsfallet tvingar fram täta inmatningspunkter. Snedbelastningen kan i princip helt elimineras med kraftelektronik i transformatorstationerna och spänningsfallet genom att generera reaktiv effekt i sektioneringspunkterna mellan transformatorstationerna, då ökar dock 50 Hz systemets komplexitet till en liknande nivå som 16 2/3 Hz systemet. I vanliga fall

³³ Ritat efter Uzuka, Tetsuo / Ikedo, 2004, sid. 64.

³⁴ Avsnittet bygger till viss del på Brauner, Günter, 1996.

nöjer man sig dock med tillräckligt täta inmatningspunkter och en viss snedbelastning, i gengäld blir banmatningsanläggningen väsentligt enklare och billigare³⁵.

En annan fördel för 50 Hz system är att transformatorer är betydligt lättare och mindre vid samma effekt som för 16 2/3 Hz.

I dagsläget är Tyskland det enda landet där höghastighetstrafik bedrivs med 15 kV 16 2/3 Hz. Anledningen är att inget annat land vars järnväg är elektrifierat med denna spänning har någon höghastighetsjärnväg. Alla andra länder elektrifierade antingen så sent att 25 kV 50 Hz redan var den vanliga banmatningsspänningen eller att de hade en låg spänning som var olämplig för höghastighetstrafik och därför nyelektrifierade de direkt med 25 kV 50 Hz.

Det finns flera artiklar som diskuterar 16 2/3 Hz kontra 50 Hz där Brauner, 1996, Steimel 2004 och von Lingen 1997 alla kommer till slutsatsen att 16 2/3 Hz till och med är att föredra vid nyelektrifiering. Gutt framhåller 1991 och även i senare artiklar fördelarna med 25 kV 50 Hz dock hävdar von Lingen uttryckligen att Gutt har fel³⁶. Det förefaller som om detta är en diskussion som huvudsakligen sker bland tyskar. Det ligger dock utanför ramarna för detta arbete att fördjupa sig i den frågan, men man kan konstatera att det inte byggts något fristående 16 2/3 Hz system de senaste decennierna, däremot många 25 kV 50 Hz system vilket väl ändå är ett starkt argument i debatten om de olika systemens fördelar vid nyelektrifieringar.

3.3 Återledning

Återledning kan utföras på ett flertal olika sätt och uppbyggnaderna är likadana oberoende av kontaktledningens frekvens och spänning. Likspänningsåterledning är dock annorlunda uppbyggd.

I idealfallet leds strömmen från matningsstationen via kontaktledningen till fordonet och tillbaka via räler eller återledningen. Då dock rälererna ligger på marken kan strömmen i princip ta vilken väg som helst. Detta ger flera problem, det tidigast uppmärksammade problemet var de kraftiga störningar som förorsakades i teleledningarna som gick parallellt med banan. Ett annat problem är att strömmen kan ta sig tillbaka via vattenledningar, staket och liknande.

Vid återledning via autotransformator är huvudsyftet att få lägre spänningsfall, längre avstånd mellan matningsstationerna och möjlighet att mata ut högre effekt.

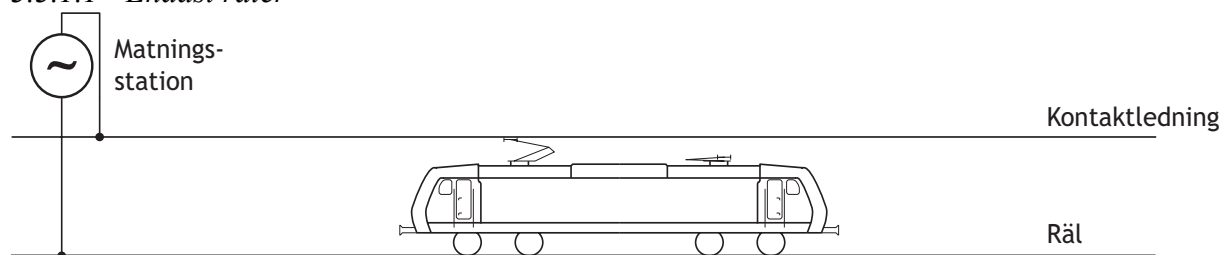
Följande principer för återledning förekommer

- Endast räler
- Räler och separat återledning
- Räler och sugtransformator
- Återledning och sugtransformator
- Autotransformator
- Koaxialkabel

³⁵ Gutt, H.-J. 1991.

³⁶ von Lingen, Jörg, 1997, sid. 14.

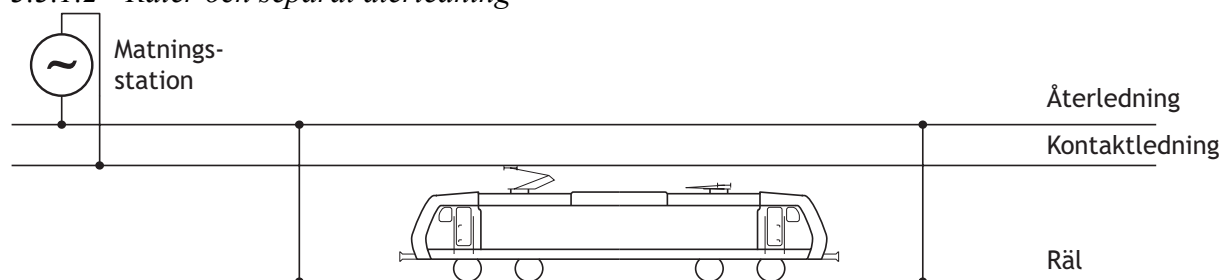
3.3.1.1 Endast räler



Figur 9. Återledning genom rälen

Att endast återleda via rälen är det enklaste systemet med de lägsta investeringskostnaderna. Nackdelen är att störningarna på kringliggande utrustning är hög. Detta utförande har även den högsta impedansen och därmed det högsta spänningsfallet. Vanligast förekommande är utförandet hos likspänningsbanor.

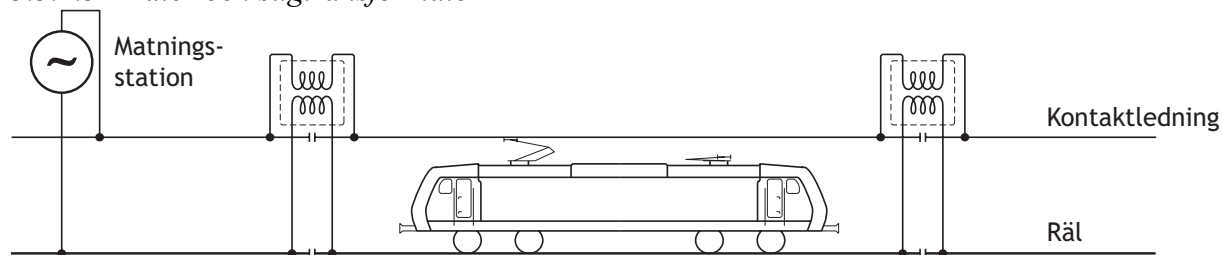
3.3.1.2 Räler och separat återledning



Figur 10. Återledning med separat återledning

Den separata återledningen upphängd i höjd med kontaktledningen i kontaktledningsstolparna minskar impedansen och störningarna avsevärt med en måttlig höjning av investeringskostnaderna. I Tyskland är detta den vanligaste typen av återledning, Sverige förekommer det dock inte på grund av den höga markresistiviteten³⁷.

3.3.1.3 Räler och sugtransformator

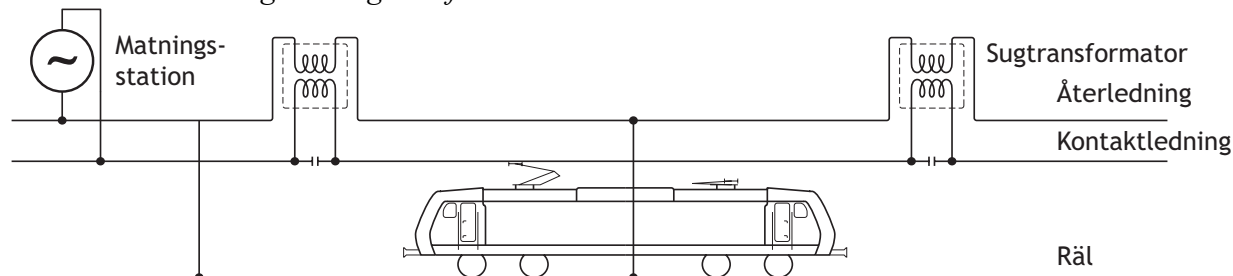


Figur 11. Återledning med sugtransformator utan separat återledning

Sugtransformator, även benämnd Booster transformer (BT) är en strömtransformator med omsättningen 1:1. Primärlindningen är i serie med kontaktledningen och sekundärlindningen i serie med återledaren, i detta fall rälen. Detta tvingar strömmen in i rälen då samma ström måste gå i primär som i sekundärlindningen.

³⁷ Friman, Edward, mfl 2005, sid. 6.

3.3.1.4 Återledning och sugtransformator

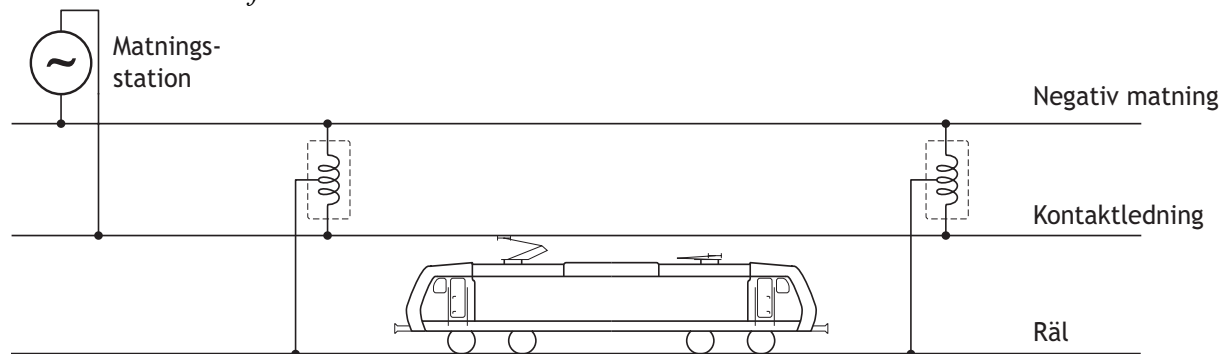


Figur 12. Återledning med sugtransformator och separat återledning

För att ytterligare minska störningarna hängs en återledning i kontaktledningsstolparna och returströmmen tvingas in dit. På detta sätt är återledningen huvudsakligen utförd i Sverige. Typiska avståndet mellan sugtransformatorerna är ca 5 km.

Nackdelen med sugtransformatorer är att det behövs ett avbrott i kontaktledningen vid varje sugtransformator. Om en strömavtagare med belastning passerar avbrottet kan det bli en ljusbåge som kan skada kontaktledningen. För att motverka detta kan en kondensator kopplas i serie med återledningen vid sugtransformatorn.³⁸

3.3.1.5 Autotransformator



Figur 13. Matning med autotransformator

I ett autotransformatorsystem används en negativ matning utöver kontaktledningen. Den negativa matningen har samma potential som kontaktledningen men ligger i motfas till denna, spänningen mellan kontaktledningen och den negativa matningen är alltså dubbla kontaktledningsspänningen. Spartransformatorerna, autotransformatorerna, är kopplade mellan kontaktledningen och matningen med mittpunkten ansluten till rälen. Eftersom spänningen är den dubbla blir strömmen bara hälften så hög som den skulle vara i ett system utan AT utom mellan de två AT där loket befinner sig.

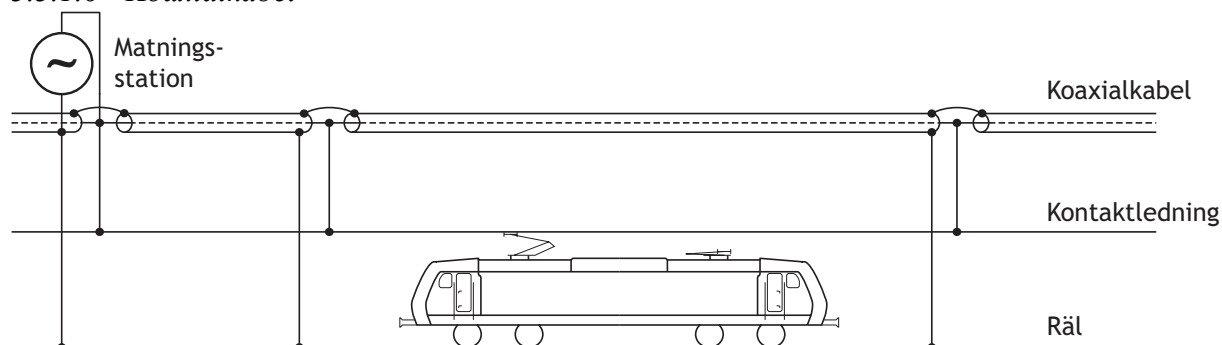
Det finns inget krav på att matningsstationen måste vara ansluten till kontaktledningen och negativa matningen, matningsstationen kan lika gärna mata ut 15 kV till kontaktledning och räl och den negativa matningen skapas först av autotransformatorerna.

Autotransformatorsystemet ger ett lägre spänningsfall och därmed möjlighet till mycket större avstånd mellan matningsstationerna och högre utmatad effekt. Avståndet mellan två AT är 10-15 km, i Sverige är deras effekt vanligtvis 5 MVA och omsättningen 33/16,5 kV.

³⁸ Oura, Yasu, 1998, sid. 52.

AT och BT systemen kan även kombineras till ett AT/BT-system. Avståndet mellan AT ökas till ca 30 km och emellan dem placeras sugtransformatorer. På detta sätt reduceras risken för telestörningar ytterligare. Systemet har både återledare och AT-ledare.³⁹

3.3.1.6 Koaxialkabel



Figur 14. Matning med koaxialkabel

I ett koaxialkabelsystem är förstärkningsledningen utförd som en koaxialkabel som ligger utmed spåret. Återledningen sker i koaxialkabelns ytterledare. Med några kilometers mellanrum är ytterledaren förbunden med spåret och innerledaren med kontaktledningen. Genom att koaxialkabeln har mycket låg impedans kommer strömmen huvudsakligen att flyta i koaxialkabeln. Systemet ger mycket låga störningar i andra ledningar.

Fördelen är att det elektriska systemet tar mycket liten plats och har goda elektriska egenskaper, nackdelen att koaxialkabeln är mycket dyr.

Koaxialkabel som återledning förekommer för närvarande endast i Japan⁴⁰.

³⁹ Friman, Edward, mfl, 2005, sid. 7-8.

⁴⁰ Oura, Yasu, 1998, sid. 52-53.

4 Översikt – Banmatningens utförande

De strömsystem som förekommer för banmatning av höghastighetsjärnvägar är 25 kV 50 Hz⁴¹, 15 kV 16 2/3 Hz samt 3 kV DC.

Italien är det enda land som kör höghastighetstrafik längre sträckor på 3 kV DC men använder det inte för kommande utbyggnader. I Frankrike förekommer 1,5 kV DC en kortare sträcka med sth 270.⁴² I övrigt är det endast 25 kV 50 Hz och i Tyskland 15 kV 16 2/3 Hz som förekommer i hastigheter över 250 km/h. Alla nya höghastighetsjärnvägar som byggs i dagsläget elektrifieras med 25 kV 50 Hz eller 25 kV 60 Hz, dvs. samma som det nationella nätets frekvens.

Begränsningen till de högre spänningarna beror främst på att säker strömvtagning vid strömstyrkor på mer än ca 2 kA är problematiska att hantera.⁴³ Vidare är effektbehovet för höghastighetsjärnvägar högt, till exempel 1-2 MVA/km för TGV-sträckorna, det skulle ge ohanterliga strömstyrkor eller kräva extremt tätt placerade matningsstationer om lägre spänningar användes.

Spänning	Sträcka 2002 [km]	Sträcka 2015 [km]
25 kV 50 Hz ⁴⁴	4140	8000
15 kV 16 2/3 Hz	644	1100
3 kV DC	237	240
1,5 kV DC	13	15

Tabell 3. Spänning på sträckor i hastigheter från och med 250 km/h. Siffran för 2015 är en ungefärlig uppskattning och inkluderar de nedan och i följande avsnitt uppräknade projekten. I övrigt är siffrorna avrundade.

⁴¹ När 25 kV 50 Hz diskuteras är även Japans Shinkansen med 25 kV 60 Hz inbegripen.

⁴² Courtois, Christian, 1994, sid. 203.

⁴³ von Lingen, Jörg, 1997, sid. 14.

⁴⁴ Inklusive 1268 km 25 kV 60 Hz.

Tabellen nedan ger en översikt över höghastighetsjärnvägar i länder där hastigheter över 250 km/h förekommer, dock är den från 2002, sedan dess har åtskilliga kilometer sträcka och flera länder tillkommit, dessa presenteras summariskt i en sammanställning nedan.

Land	Spänning	250 km/h och högre [km]	200-249 km/h [km]	Totalt [km]
Tyskland	15 kV 16 2/3 Hz	644	895	1 539
Italien	3 kV DC	237	531	768
Spanien	25 kV 50 Hz	376	65	441
	3 kV DC	–	200	200
	summa	376	265	641
Belgien	25 kV 50 Hz	127	11	138
Frankrike	25 kV 50 Hz	1 387	377	1 764
	1,5 kV DC	13	572	585
	summa	1 400	949	2 349
Japan	25 kV 50 Hz	982	–	982
	25 kV 60 Hz	1 268	–	1 268
	summa	2 250	–	2 250

Tabell 4. Sträckor trafikerade med höghastighetståg i länder där hastigheter på minst 250 km/h förekommer (år 2002)⁴⁵

Nedan följer en översikt över samtliga höghastighetsjärnvägar där antingen trafik redan förekommer eller byggnationerna påbörjats eller kommer att påbörjas inom några år.

Italien håller på att bygga ett höghastighetsnät som kommer att omfatta omkring 1 400 km när det är klart. 650 kilometer håller redan på att byggas. Nätet blir huvudsakligen elektrifierat med 25 kV 50 Hz undantaget vissa knutpunkter där nätet gränsar till befintliga sträckor, där blir spänningen 3 kV DC. Nätet byggs huvudsakligen för 300 km/h och avses trafikeras i 250 km/h.⁴⁶

TAV - Treno Alta Velocità SpA ansvarar för utbyggnaden av en stor del av Italiens höghastighetsnät, TAV ägs av RFI (Rete Ferroviaria Italiana), Italiens infrastruktur-förvaltare⁴⁷.

Korea har höghastighetsjärnvägen KTX som baseras på TGV's teknik. Fullt utbyggd 2010 kommer den att omfatta 412 km nya järnvägar och trafikeras i 300 km/h. Nätet är elektrifierat med 25 kV 60 Hz.⁴⁸ I dagsläget är hela nätet i drift, en nybyggd höghastighetssträcka Seoul-Daegu (281,6 km) samt uppgraderade banor Daejeon-Mokpo (248,4 km) och Daegu-Busan (126,9 km). Den senare ska ersättas av en nybyggd sträcka som blir 3,5 km längre via Gyeongju med väsentligt kortare restid.⁴⁹

Taiwan kommer i slutet av 2005 att ta sin 345 km långa höghastighetsjärnväg i trafik, sth blir 300 km/h⁵⁰ undantaget stationer mm. Tekniken baseras på japanska Shinkansen. Sträckan är elektrifierad med 25 kV 60 Hz. 7 transformatorstationer byggs, ytterligare två försörjer verkstäder och uppställningsplatser. Alla matningsstationer är identiska, deras effekt är 80 MVA, Varje transformatorstation är dimensionerad så att den inte bara klarar den ordinarie belastningen utan även kan ersätta en angränsande transformatorstation i händelse av en

⁴⁵ UIC International Railway Statistics 2002, tabell 10: Lines worked with HS rolling stock, sid. 134.

⁴⁶ TAV High speed lines (050628).

⁴⁷ TAV RFI – Rete Ferroviaria Italiana (050628).

⁴⁸ Alstom, 2004, *The High Speed Rail System in Korea*, (050628).

⁴⁹ Chun-Hwan, Kim, 2005; sid. 8.

⁵⁰ Taiwan High Speed Rail Corporation, *Construction Project Overview*, (050628).

driftstörning. Transformatorstationerna är anslutna till 161 kV 60 Hz trefas, denna anslutning liksom all utrustning i transformatorstationen är dubblerad för att kunna garantera att matningen upprätthålls även i händelse av driftstörningar.⁵¹

Kina har redan 30 km Maglev, magnetsvävarbana, i trafik mellan Shanghai-Pudong International Airport och Shanghai's finanscentrum Lujiazui. Resehastigheten är 430 km/h och systemet är tyska Transrapid levererat av Siemens. Anläggningen togs i trafik 2004.⁵² Även en kortare utbyggnad diskuteras, men magnetsvavartekniken är avförd som teknik för Kinas kommande höghastighetsnät. Den är för dyr i förhållande till konventionell järnväg.⁵³

Till olympiaden 2008 ska 971 km höghastighetsjärnväg mellan Wuchang och Guangzhou vara klara att tas i drift. Hastigheten ska bli 250-300 km/h.⁵⁴ Frankrike med TGV, Tyskland med ICE och Japan med Shinkansen konkurrerar om att leverera tågen.⁵⁵ Även fler andra höghastighetsjärnvägar planeras, totalt omkring 3000 km, dock kommer de till stor del att byggas för 200 km/h. Kina är elektrifierat med 25 kV 50 Hz.

Ryssland planerar en höghastighetsjärnväg, Sokol, mellan St. Petersburg och Moskva. Sträckan kommer att bli 654 km lång och hastigheten blir 250-300 km/h. Strömförsörjningen blir 2AC 25 kV 50 Hz.⁵⁷

Holland håller också på att bygga en höghastighetsjärnväg, HSL-Zuid. Högsta hastighet blir 300 km/h och kontaktledningsspänningen 25 kV 50 Hz. Nätet kommer att förbindas med det belgiska och franska höghastighetsnätet. Hela nätet kommer att omfatta 125 km varav 85 km renodlad höghastighetsjärnväg.⁵⁸

Storbritannien bygger en 109 km lång höghastighetsjärnväg för att förbinda Channel Tunnel med London, projektet kallas Channel Tunnel Rail Link. Första avsnittet öppnade 2003 och hela sträckan beräknas vara klar 2007.⁵⁹ Kontaktledningsspänningen blir 25 kV 50 Hz.

USA med flera länder planerar snabbtåg i hastigheter över 200 km/h men under 250 km/h, dessa är därför ej upptagna i förteckningen.

⁵¹ Taiwan High Speed Rail Corporation, *Electrification System*, (050628).

⁵² Siemens, *Transrapid Shanghai*, Shanghai, China, (050629).

⁵³ People's Daily Online, *Rail track beats Maglev in Beijing-Shanghai High Speed Railway*, Beijing 2004.

⁵⁴ China Academy of Railway Sciences *Wuchang-Guangzhou line will commence construction within the year and Guangzhou-Beijing travel time will only take 10 hours by 2010*, (5. augusti 2004), (050629).

⁵⁵ People's Daily Online China opens railway equity to foreign investors (23. juni 2005) anger 989 km och år 2010.

⁵⁶ Takahashi, Kosuke, *Sweating bullets over new Chinese train*, Asia Times Online, Shanghai, 2004.

⁵⁷ HSR St.Petersburg – Moscow (050629).

⁵⁸ HSL-Zuid, *HSL-Zuid Kernfeiten* (050629).

⁵⁹ Channel Tunnel Rail Link, *Introduction and Benefits* (050629).

5 Tyskland



Figur 15. Schematisk karta över tyska höghastighetssträckor⁶⁰,
Endast NBS är inritade, ICE trafikerar ett mycket större nät

I Tyskland är järnvägen formellt uppdelad i trafik och infrastruktur, spåren av förvaltas av DB Netz, ett dotterbolag till DB, Deutsche Bahn AG, den forna statliga järnvägsförvaltningen, nu bolagiserad men fortfarande statsägd. DB med dotterbolag har fortfarande ett de facto-monopol, framförallt på lönsam persontrafik. Persontrafik som upphandlas av delstaterna körs till viss del av andra bolag, till exempel Connex, men även där är DB dominerade. På godstrafiksiden är konkurrensen större, huvudsakligen är det dock småbolag som kör inom ett begränsat geografiskt område. All höghastighetstrafik körs av DB.

Normalspår	35 544 km
Varav elektrifierade sträckor	19 378 km
Varav höghastighetssträckor (NBS)	ca 760 km
smalspår	49 km
Total sträcka	35 593 km
Total spårlängd	65 782 km

Tabell 5: Tyska järnvägsnätet 2003⁶¹

⁶⁰ Karta från Werske, André, *ICE Streckennetz 2005*, redigerad av N.B.

⁶¹ Die Bahn, *DB Daten & Fakten 2003*.

5.1 Höghastighetstrafik

Till skillnad från många andra höghastighetsjärnvägar består ICE-nätet av en blandning av nybyggda och uppgraderade banor. De nybyggda banorna trafikeras i hastigheter upp till 300 km/h, de uppgraderade vanligtvis kring 160-200 km/h eller lägre. De nybyggda banorna kallas NBS, Neubaustrecken, de uppgraderade ABS, Ausbaustrecken. Ofta kan de nybyggda sträckorna vara förhållandevis korta bitar som tas i drift efterhand och ombyggnaden av befintliga spår sker ofta under pågående trafik. Genom att ICE-tågen inte bara trafikerar höghastighetssträckor och uppgraderade sträckor blir det tyska ICE-nätet mycket omfattande och jämfört med andra länders nät kan väldigt många orter nås med höghastighetståg med förhållandevis korta restider.

Den tyska ICE-trafiken började 1991 och en utbyggnad både av höghastighetsjärnvägarna och av linjenätet pågår kontinuerligt.

5.1.1 Nätets uppbyggnad

Idag är följande sträckor renodlade höghastighetssträckor.

	Trafikstart	Längd [km]	Sth [km/h]
Würzburg - Hannover ⁶²	1991	327	250
Mannheim - Stuttgart	1991	99	250
Hannover - Berlin	1998	153	250
Köln-Rhein/Main ⁶³	2002	177	300
Nürnberg - Ingolstadt ⁶⁴	2006	78	300
Ebensfeld – Erfurt ⁶⁵	Bygge pågår	107	300
Erfurt – Leipzig/Halle ⁶⁶	Bygge pågår	123	300
Karlsruhe - Basel	2012		
Stuttgart - Ulm	8 år byggtid ⁶⁷	61	250

Tabell 6. Neubaustrecken i ICE-nätet. Längden avser endast höghastighetssträckorna med minst 250 km/h

Exempel på kombinationen av nya och uppgraderade banor är sträckan Nürnberg-München. På sträckan Nürnberg - Ingolstadt, totalt 89 km varav 78 km helt nybyggd järnväg, byggs den nya järnvägen för sth 300. På sträckan Ingolstadt – München uppgraderas 82 km befintlig järnväg så att hastigheter på 160-200 km/h blir möjliga. Hela sträckan tas i drift till tidtabellsskiftet i december 2006

Även sträckan Nürnberg - Erfurt - Halle/Leipzig-Berlin är sammansatt av både helt nybyggda och uppgraderade avsnitt; Nürnberg – Ebensfeld är 83 km uppgraderad järnväg, Ebensfeld – Erfurt blir 107 km helt ny bana och Erfurt – Leipzig/Halle, 123 km, likaså. Detta avsnitt är tänkt att trafikeras i 250 km/h men spårgeometrin medger sth 300 km/h. Leipzig/Halle – Berlin blir däremot 187 km uppgraderad järnväg. Korta avsnitt av sträckan har redan öppnats.⁶⁸

⁶² Werske, André, *ICE Streckennetz 2005*, 050629 är källa till de första 3 sträckorna.

⁶³ Deutsche Bahn AG, 2005, *Die Neubaustrecke Köln - Rhein/Main* (050629).

⁶⁴ Deutsche Bahn AG, 2005, *Neu- und Ausbaustrecke Nürnberg - Ingolstadt – München* (050629).

⁶⁵ Deutsche Bahn AG, 2005, *Aus- und Neubaustrecke Nürnberg - Erfurt - Leipzig/Halle – Berlin* (050629).

⁶⁶ Deutsche Bahn AG, 2005, *Aus- und Neubaustrecke Nürnberg - Erfurt - Leipzig/Halle – Berlin* (050629).

⁶⁷ Deutsche Bahn AG, 2005, *Neubaustrecke Stuttgart – Ulm* (050629).

⁶⁸ Deutsche Bahn AG, *Neubaustrecke Erfurt - Leipzig/Halle Streckenkarte* (050629).

5.1.2 Banmatning

Tysklands normalspåriga järnvägar och höghastighetsjärnvägar är elektrifierade med 15 kV 16 2/3 Hz (börvärde 16,700 Hz), dock finns vissa lokaltåg och industribanor med andra spänningar, till exempel en kortare järnväg i Harz, Rübelandbahn, mellan Blankenburg och Königshütte, som elektrifierades med 25 kV 50 Hz på 1960-talet av dåvarande DR i Östtyskland.

Totalt är ca 19 000 km av 36 000 km elektrifierade. Tyskland är det enda landet som bedriver höghastighetstrafik med 15 kV 16 2/3 Hz. DB Energie förvaltar all utrustning som rör banmatningen, de säljer även elenergin till operatörerna som trafikerar DB's nät.

Tysklands järnväg har ett eget 110 kV 16 2/3 Hz nät som är asynkront mot det nationella elnätet och således kräver egen last- och frekvensreglering. Strömmen genereras antingen i järnvägens egna 16 2/3 Hz kraftverk eller omformas med antingen roterande omformare eller statiska omriktare. Den första statiska omriktaren togs i drift 1994⁶⁹. Järnvägens egna kraftverk är huvudsakligen olje- och kolkraftverk men det finns även vattenkraftverk och pumpkraftverk. DB Energie har också en generator i ett kärnkraftverk.

Kontaktledningen matas via transformatorstationer som är ansluta till 110 kV nätet. I forna Östtyskland försörjs en del av nätet fortfarande med synkron-synkron omformare som matar kontaktledningen direkt. I takt med att järnvägen moderniseras läggs dock omformarstationerna ned och ersätts av transformatorstationer och 110 kV matarledningar.⁷⁰

Det högspända lågfrekvensnätet är gemensamt med Österrike och Schweiz.

Anslutna till 110 kV banmatningsnätet fanns 2004 176 transformatorstationer och totala installerade effekten i omformar/omriktarstationer och kraftverk var 2587 MW 2001. Totala installerade effekten i tyska 16 2/3 Hz systemet var 3 211 MW 2001⁷¹, detta avser alltså även de omformare som matar kontaktledningen direkt.

I vanlig drift är kontaktledningen i princip inte sektionerad, endast vid störningar i 110 kV nätet sektioneras den. Det gör också att nollspänningssektioner endast förekommer undantagsvis. Mellan kontaktledningsnätet som försörjs via 110 kV matarledningsnätet och kontaktledningsnätet som försörjs direkt från omformarstationer finns nollspänningssektioner. Även mellan två kontaktledningsavsnitt som matas av olika omformarstationer finns nollspänningssektioner, dessa är spänningslösa om omformarstationerna inte är infasade mot varandra.

Det tyska höghastighetsnätet som trafikeras av olika typer av ICE-tåg har samma strömförsörjning som det konventionella järnvägsnätet. De "Neubaustrecken" (nybyggda höghastighetssträckor) som har byggts i öst försörjs genomgående med transformatorer från 110 kV nätet.

På höghastighetssträckorna är avstånden mellan transformatorstationerna i regel 20-40 km. En transformatorstation består i normalfall av 2-3 transformatorer på 10-15 MVA vardera.⁷²

5.1.2.1 Återledning

Återledningen på de konventionella sträckorna sker vanligtvis genom räler eller med extra återledare. Sugtransformatorer förekommer endast i ringa omfattning.

⁶⁹ Lönard, Detlef, Jens Northe, Dorman Wensky, 1995, sid. 182.

⁷⁰ König, Ulrich mfl, 2002, sid. 12.

⁷¹ König, Ulrich mfl, 2002 sid. 5.

⁷² Där ej annat anges baserar avsnittet på Ebhart, Stefan mfl, sid. 152 ff.

1998 gjordes första fullskaleförsöken med AT system, resultatet blev att man byggde en pilotanläggning på den 133 km långa sträckan Prenzlau-Stralsund som blev färdigställd 2002. Totalt 5 AT-stationer finns längs sträckan.⁷³ En av anledningarna till att försöken inte började tidigare var brist på enkelt ombyggbara sträckor, i regel har man ej heller haft förstärkningsledningar för kontaktledningen som kunde byggas om till negativa matningen.

⁷³ König, Ulrich mfl, 2002 sid. 12.

6 Frankrike



Figur 16. Franska höghastighetssträckor⁷⁴

1997 delades trafiken och infrastrukturen upp i Frankrike. Resultatet blev att RFF (Réseau Ferré de France) äger infrastrukturen och ansvarar för dess vidareutveckling och utbyggnad. SNCF (Société Nationale de Chemins de fer) har däremot fortfarande hand om spårunderhållet mm. Vidare bedriver SNCF i princip all trafik, både person- och godstrafik, några konkurrerande järnvägsbolag förekommer i princip inte.⁷⁵

⁷⁴ Karta från Werske, André, *TGV - Liniennetz 2005*, redigerad av N.B.

⁷⁵ Schönfisch, Jochen, 2002.

Frankrike har totalt 32 888 km sträcka varav 31 986 km i drift.

Huvudlinjer med anslutande linjer	31 151 km
Höghastighetssträckor (LGV)	1 547 km
Dubbel- eller flerspårssträckor	16 139 km
Enkelspår (normalspår)	14 845 km
Enkelspår (meterspår)	167 km
Elektrifierade sträckor	14 507 km
1,5 kV DC	5 859 km
25 kV AC	8 256 km
Övriga	122 km
Industrispår ⁷⁶	834 km
Total spårlängd, huvudlinjer	53 270 km
Modernt spår	28 671 km
Spår för 220 km/h eller högre	3 251 km

Tabell 7. Franska järnvägssystemet⁷⁷

6.1 Höghastighetstrafik⁷⁸

Frankrike var först i Europa med höghastighetstrafik på järnväg och har nu ett stort nät med nybyggda höghastighetssträckor.

Höghastighetstrafiken bedrivs både på för ändamålet nybyggda banor och uppgraderade. Tågen trafikerar även gamla sträckor med lägre hastigheter. Tågen kallas TGV (Trains à grande Vitesse – ”höghastighetstågen”) och finns i flera olika generationer. TGV-trafiken körs av SNCF och spåren ägs av RFF, dock förekommer vissa samarbeten med andra företag i gränsöverskridande trafik.

I september 1981 började höghastighetstrafiken på sträckan St. Florentin/Vergigny (Yonne)-Sathoney (Rhône), första Ligne à grande vitesse, LGV (”Höghastighetslinjen). De nybyggda sträckorna benämns LN – ligne nouvelle.

6.1.1 Nätets uppbyggnad

	Namn	Sträcka	Längd ⁷⁹	Sth ⁸⁰	Trafikstart
LN1	Sud est	Paris-Lyon	410 km	300	1981/1983
LN2	Atlantique	Paris-Le Mans/Tours	280 km	300	1990
LN3	Nord	Paris-Lille/Calais	333 km	300	1993
LN4	Rhône Alpes	Lyon-Nîmes/Marseille	177 km	300	1992
	Junction	Förbinder TGV kring Paris	122 km	300	1994
LN5	Méditerranée		251 km	320	2001
LN6	Est		300 km	320	2007

Tabell 8. Höghastighetssträckorna i TGV nätet⁸¹

Första juli 2001 fanns totalt 1 520 km höghastighetssträckor.

⁷⁶ Engelska: Lines for freight services.

⁷⁷ RFF Annual report 2003.

⁷⁸ Schönfisch, Jochen, 2002.

⁷⁹ Huot, Eric, 2001, sid. 12 ff.

⁸⁰ Största tillåtna hastighet idag, kan ha varit lägre då sträckan var ny.

⁸¹ Courtois, Christian, epost juni 2005.

6.1.2 Fordon⁸²

Det första TGV-tåget togs i drift 1981 och sedan dess har flera olika generationer tåg utvecklats, men i huvuddragen finns många likheter.

Tågen består av två Bo'Bo' drivenheter med vagnar emellan. Maximala axeltrycket är 17 ton. Vagnarna vilar på jacobsboggier men boggin närmast drivenheten är en vanlig boggi. Alla TGV-tåg är tvåsystemsfordon och går att köra på både 25 kV 50 Hz och 1,5 kV likspänning. Vissa generationer kan även köras på andra spänningar. Maximal effekt står dock endast till förfogande vid 25 kV, detta bland annat för att förenkla drivutrustningens uppbyggnad. Första generationens TGV-tåg hade från början sth 260 km/h och 6 MW effekt, snart höjdes effekten till 6,4 MW och sth till 270 km/h. Nu har den ytterligare höjts till 300 km/h för de flesta tågen ur första generationen, effekten är dock densamma.

De kraftigaste stigningarna i nätet är 35 promille, i dessa minskar hastigheten något.

Samtliga tåg är byggda av Alstom med vissa delar av Bombardier.

TGV generation		1 TGV Sud-Est	2 TGV Atlantique	2 TGV Reseau	Eurostar	Eurostar	2 Thalys PBA	3 TGV Duplex	3 Thalys PBKA
Idrifttagande		1981	1988	1993	1994	1997	1996	1996	1997
Antal levererade		109	105	80	31	7	10	30	17
Antal mellanvagnar		8	10	8	18	14	8	8	8
Boggier/tåg		13	15	13	24	20	13	13	13
Varav drivboggier		6	4	4	6	6	4	4	4
Längd	m	200,2	237,6	200,2	393,7	318,9	200,2	200,2	200,2
Egenvikt	t	384	450	385	723	620	385	380	385
Vikt lastad	t	417	490	418	787	665	418	425	418
Sittplatser		386	485	377	794	578	377	516	377
Sth	km/h	270-300	300	300	300	300	300	300	300
Effekt/tåg									
AC 25 kV 50 Hz	kW	6 400	8 800	8 800	12 240	12 240	8 800	8 800	8 800
DC 1,5 kV	kW	3 100	3 600	3 680	4 000	-	3 680	3 680	3 680
DC 3 kV	kW	-	-	3 680	5 700	5 700	3 680	-	3 680
AC 15 kV 16 2/3 Hz	kW	2 800	-	-	-	-	-	-	3 680
DC 750 V	kW	-	-	-	3 400	3 400	-	-	-

Tabell 9. TGV fordon⁸³

6.1.3 Banmatning⁸⁴

Av historiska skäl har Frankrike många sträckor elektrifierade med 1,5 kV likspänning. Strömmen genererades till stor del i egna kraftverk och överfördes till likriktarstationerna i egna trefas kraftledningar. Avstånden mellan likriktarstationerna var mellan 8 km och 25 km beroende på trafik och överförbar effekt i kontaktledning och matande kraftnät.

På 1950-talet påbörjade SNCF undersökningar för en elektrifiering med 25 kV 50 Hz. Loken kom att utföras som likriktarlok.

Trots att banmatningen med 25 kV 50 Hz är väsentligt mycket mer ekonomisk än 1,5 kV DC har fransmännen valt att inte ställa om det befintliga nätet utan i stället bygga nyelektrifierade sträckor med 25 kV och i övrigt satsa på tvåsystemfordon för båda spänningarna. Fortfarande 1994 ägde SNCF via dotterbolaget SHEMA (Société Hydro-Électrique du Midi) ett stort antal kraftverk, tillräckligt för att täcka knappt en tredjedel av sin energiförbrukning. 1994 sparade

⁸² Schönfisch, Jochen, 2002.

⁸³ Schönfisch, Jochen, 2002.

⁸⁴ Courtois, Christian, 1994.

SNCF på detta sätt cirka 300 miljoner FF gentemot om de skulle ha köpt energin från utomstående.

Strömsystem	Längd	Andel
DC 1,5 kV	5 859 km	41 %
AC 50 Hz 25 kV	8 256 km	58 %
Övriga	122 km	1 %
Summa	14 237 km	100 %

Tabell 10. Banmatning i Frankrike, 2003⁸⁵

Övriga förekommande strömsystem är kortare sträckor med DC 3 kV, DC 750 V och AC 15 kV 16 2/3 Hz. Av 25 kV sträckorna är 1740 km utförda som AT-system.⁸⁶

88,1 % av transportarbetet utförs av elektrifierade tåg.

6.1.3.1 Höghastighetssträckorna

När TGV-nätet planerades genomfördes omfattande studier framförallt med avseende på osymmetrier i det matande 3-fas-nätet. Anslutningen sker till 400 kV och 225 kV nätet under förbehåll att beloppet av osymmetrin i det matande nätet vid normal drift maximalt får uppnå 1 %, vid driftstörningar 1,5 %. Genom att transformatorstationerna placerades så nära knutpunkter i 400/225 kV nätet som bara möjligt gick det att hålla sig inom dessa gränser.⁸⁷ Exempelvis är transformatorstationerna för LN 5 anslutna till 225 kV.⁸⁸ Av nybyggda LGV Est (LN 6) är 4 transformatorstationer anslutna till 225 kV och en till 400 kV.⁸⁹

De nybyggda höghastighetsbanorna strömförsörjs nästan uteslutande med 25 kV 50 Hz, samtliga SNCF: s TGV är dock tvåsystemtåg för att även kunna trafikera sträckor med 1,5 kV DC då de nybyggda höghastighetsbanorna endast utgör en del av hela TGV-nätet. Till exempel är den 14 km långa förbifarten kring Tours en 1,5 kV DC elektrifierad sträcka som trafikeras i 270 km/h⁹⁰.

När SNCF började elektrifiera räckte det med en eller två 10 MVA transformatorer per transformatorstation, avståndet mellan stationerna var 60-80 km. Kring Paris behövdes dock högre effekt.

Vid bygget av första höghastighetssträckan Paris-Lyon saknades lämpliga anslutningspunkter till industrinätet i vissa områden, därför elektrifierades sträckan med 2AC 25 kV och autotransformatorer. Valet av 2AC 25 kV förblev dock inte självklart utan nödvändigheten bedömdes från fall till fall. 1993 elektrifierades Poitiers - La Rochelle med 1AC 25 kV medan LN3 är elektrifierad med AT-system. Som en jämförelse skulle det ha behövts 13-14 transformatorstationer om sträckan skulle ha elektrifierats med 1AC 25 kV i stället för dagens 5.⁹¹ På grund av det alltmer ökande effektbehovet framstår dock 2AC 25 kV med AT oftast som det givna valet.

⁸⁵ RFF Annual report 2003.

⁸⁶ Menuet, Jean-Pierre, 2001, sid. 9.

⁸⁷ Leloup, Alain, 1995.

⁸⁸ Schönfisch, Jochen, 2002, sid. 65.

⁸⁹ Schönfisch, Jochen, 2002, sid. 67.

⁹⁰ Courtois, Christian, 1994, sid. 203.

⁹¹ Courtois, Christian, 1994, Teil 2, sid. 204.

Inför nybyggnaden av sträckan Paris-Strasbourg (LN6) diskuterades 3 olika alternativ för matningen.⁹²

- 1 AC 25 kV via 15 transformatorstationer med 20 MVA effekt vardera och en ny högspänningsledning för strömförsörjning av matningsstationerna. Med ytterligare en matningsstation skulle hastigheten kunna höjas från 320 km/h till 350 km/h.
- 2 AC 25 kV med autotransformatorer och 5 transformatorstationer på vardera 70 MVA samt 70 km högspänningsledningar till det allmänna elnätet.
- 2 AC 25 kV med autotransformatorer och 8 transformatorstationer med en effekt på 30-40 MVA vardera. Vidare skulle 120 km högspänningsledning för att förbinda transformatorstationerna med det allmänna elnätet behövs.

Slutsatserna blev att det andra alternativet är mest fördelaktigt, det kräver endast 70 % av investeringarna för tredje alternativet. Det första alternativet kräver ca 80 % av investeringarna för tredje alternativet.

Idag är alla höghastighetssträckor matade via autotransformator utom delar av den först byggda sträckan, LN1. Denna sträcka är också den effektmässigt lägst belastade. På sträckan utan autotransformatorsystem är avståndet mellan transformatorstationerna endast hälften.

Sträcka	Matning	Transformatorstationer	
		Antal	Avstånd
LN1	1 AC 25 kV och 2 AC 25 kV	8	45/90 km
LN2	2 AC 25 kV	4	70 km
LN3	2 AC 25 kV	5	55 km
LN4	2 AC 25 kV	2	60 km
LN5	2 AC 25 kV	5	60 km
LN6	2 AC 25 kV	5	60 km

Tabell 11. Översikt över matningsstationer för franska höghastighetsnätet

6.1.3.2 Effektbehov

En överslagsberäkning för effektbehovet kan beräknas ur tågtätheten och tågens effekt. Denna blir mycket grov men kan användas som en uppskattning. I det fallet utgår man ifrån att tågens effektförbrukning är konstant och lika med deras nominella effekt.

För en fördjupad studie måste effektförbrukningen simuleras, där hänsyn tas till fordonens egenskaper, tidtabellen, banans stigningar mm.

Sträcka		Effekt	Tågföljd	Hastighet	Effektbehov
		[MVA]	[min]	[km/h]	[MVA/km]
Paris-Lyon	LN1	16	5/4	270/300	0,8
Paris-Le Mans/Tours	LN2	20	4	300	1
Paris-Lille	LN3	20	3	300	1,2
Lyon-Marseille	LN4/LN5	20	3	300/320	1,2
Paris Strasbourg	LN6	20	3	320/350	1,2/2,0

Tabell 12. Effektbehov för TGV-sträckor⁹³

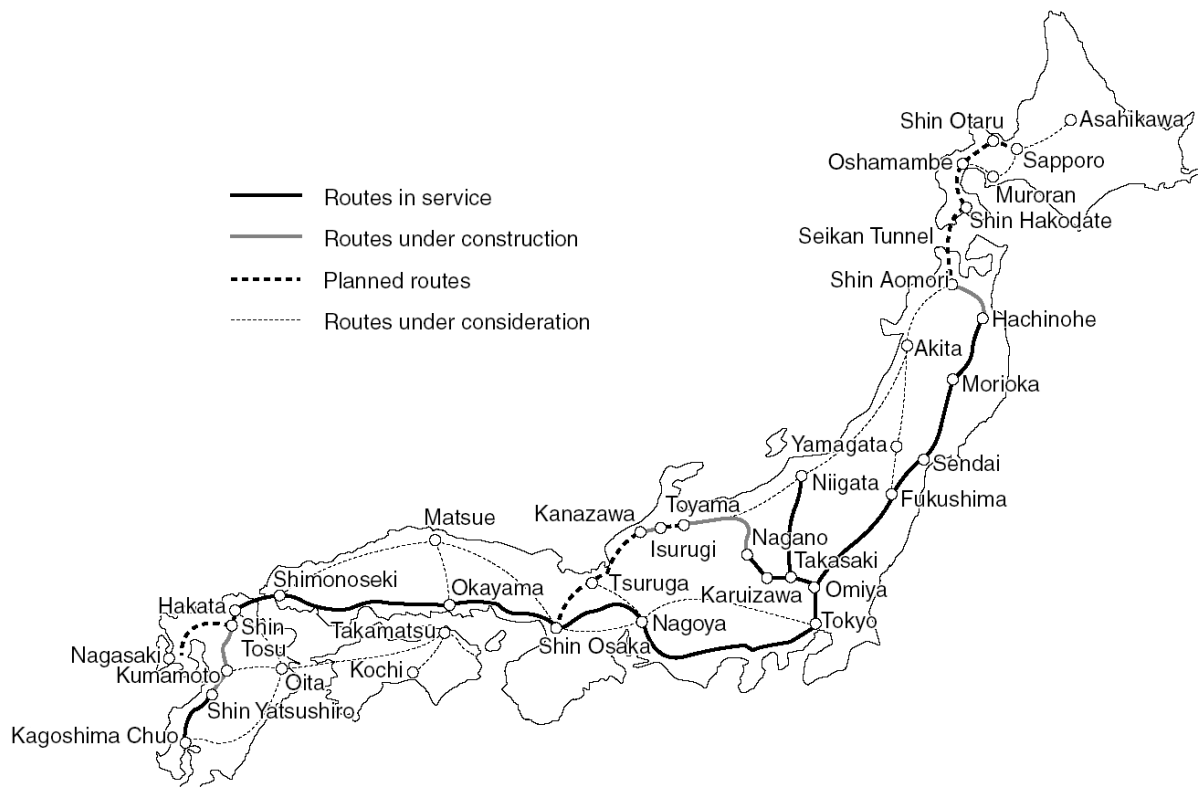
⁹² Courtois, Christian, epost juni 2005.

⁹³ Courtois, Christian, epost juni 2005.

Vanligtvis går två tågsätt multipelkopplade, den upptagna effekten ovan är för ett helt tåg, ett TGV-tågsätt tar upp halva denna effekt. Effekten är den upptagna effekten vid strömavtagaren med hänsyn tagen till förluster i traktionsutrustningen och hjälpkraft med flera förbrukare.

Paris-Lyon trafikeras av första generationens TGV-tåg, dessa har lägre effekt än senare generationer. Tågföljd avser tiden mellan totala antalet tåg i båda riktningarna.

7 Japan



Figur 17. Japanska höghastighetsnätet⁹⁴

I Japan bedrivs järnvägstrafiken av ett stort antal statliga och privata bolag. 1987 delades det tidigare statliga bolaget JNR (Japanese National Railways) upp i 6 oberoende persontrafikbolag och ett godstrafikbolag. Bolagen kallas JR Hokkaido, JR East, JR Central; JR West, JR Shikoku, JR Kyushu samt godstrafikbolaget JR Freight. Persontrafikbolagen äger sina egna spår, godstrafikbolaget använder däremot persontrafikbolagens spår. Bolagen är delvis privatiserade.

Utöver JR finns 150-talet andra järnvägsbolag, både privata och offentligt (t.ex. kommunalt) ägda. Bland dessa finns också många företag som uteslutande bedriver spårvägar eller tunnelbanor. Även de privata bolagen bedriver vanligtvis trafik på sin egen spåranläggning.⁹⁵

⁹⁴ Karta från Kitagawa, Takashi, 2005, sid. 14.

⁹⁵ Terada, Kazushige, 2001 sid. 48 ff.

	Spårvidd	Sträcka
JR		
	1067 mm	17 168 km ⁹⁶
	1435 mm	8 km
JR Shinkansen	1435 mm	2 453 km ^{97 98}
Övriga (ej JR) bolag		
	762 mm	47 km
	1067 mm	5 177 km
	1372 mm	81 km
	1435 mm	1 253 km
1067 mm / 1435 mm		15 km
Total sträcka		26 202 km

Tabell 13. Japanska järnvägsnätet⁹⁹

Knappt två tredjedelar av nätet är elektrifierade, 9 962 km hos JR och 5 492 km hos övriga järnvägsbolag. Drygt en tredjedel av nätet består av dubbelspår, 5 964 km hos JR och ca 3 400 km hos övriga järnvägsbolag.¹⁰⁰

7.1 Höghastighetstrafik

Japanska höghastighetstrafiken kallas Shinkansen, trafiken bedrivs av de olika JR-bolagen beroende på sträcka.

Tokaido Shinkansen (Tokyo-Osaka) öppnades 1964 som världens första höghastighetslinje. Idag finns knappt 2 000 km höghastighetssträckor i drift och det finns omfattande utbyggnadsplaner. Japans nät har högst kapacitet med avseende på sittplatser per timme och punktligheten är den högsta i världen. Japan är landet där järnvägen har störst marknadsandel av persontrafiken.

⁹⁶ Här ingår även dubbelräknade sträckor som är 3-skens eller parallella spår med 1067 och 1435 mm.

⁹⁷ Här ingår även dubbelräknade sträckor som är 3-skens eller parallella spår med 1067 och 1435 mm.

⁹⁸ Här inkluderas även Shinkansen-sträckor som trafikeras i hastigheter lika med eller lägre än 200 km/h.

⁹⁹ E-post från Göran Bäckström september 2005. Siffrorna aktuella per 31 juli 2005.

¹⁰⁰ E-post från Göran Bäckström september 2005. Siffrorna aktuella per 31 juli 2005. Till och med 2001 finns japansk officiell statistik tillgängligt på Internet <http://www.stat.go.jp/data/chouki/zuhyou/12-05.xls>.

7.1.1 Nätets uppbyggnad

Namn	Sträcka	Längd [km]	Sth [km/h] ¹⁰¹	Trafikstart
Tokaido Shinkansen	Tokyo - Osaka	515 ¹⁰²	270	1964
San'yo Shinkansen	Osaka - Hakata	554 ¹⁰³	300	1972
Tohoku Shinkansen	Tokyo - Omiya	31	275	1991
	Omiya - Morioka	465	275	1982
	Morioka - Hachinoe	96,6	275	2002
Joetsu Shinkansen	Omiya - Niigata	270	275	1982
Hokuriku Shinkansen	Takasaki - Nagano	117,4	260	1997
Kyushu Shinkansen	Shin Yatsushiro - Kagoshima-chuo	126,1	260	2004
	Shin Yatsushiro - Hakata	~150	---	byggs

Tabell 14. Japanska höghastighetsnätet ¹⁰⁴

Vissa andra sträckor kallas också Shinkansen men trafikerar i hastigheter under 200 km/h, dessa är varken upptagna i tabell 14 eller på kartan, dock är dessa medräknade i Shinkansen i tabell 13.

7.1.2 Banmatning

Japans konventionella järnvägsnät är till största delen elektrifierat med 1 500 V DC eller 20 kV 60 Hz. Strömmen tas från det nationella 3-fas nätet, kring Tokyo försörjs järnvägen av två egna kraftverk.

Japans elnät har 50 eller 60 Hz i olika delar av landet. Shinkansen-linjerna anpassar sig till detta, de är elektrifierade med 25 kV 50 Hz eller 60 Hz. Fordon som trafikerar linjer där båda frekvenser förekommer är utförda som tvåfrekvensfordon. Yamagata-Shinkansen är elektrifierad med 20 kV 50 Hz, denna är dock ingen höghastighetssträcka.¹⁰⁵

Shinkansens matning är huvudsakligen utförd som ett AT-system med systemspänningen 50 kV; 60 kV matas ut från transformatorstationerna. Avståndet mellan stationerna är 20-60 km beroende på belastning. I och kring Tokyo för Tohoku- och Tokaido Shinkansen används ett koaxialkabelsystem eftersom det är ont om plats och belastningen är mycket hög. Systemspänningen är 25 kV och 30 kV matas ut från transformatorstationerna. Avståndet mellan transformatorstationerna är ungefär 10 km.¹⁰⁶

Hela Tokaido-Linjen har kontaktledningsspänningen 25 kV 60 Hz. Matningen är utförd som ett AT system med 50 kV systemspänning.¹⁰⁷ Landsfrekvensen mellan Tokyo och Mishima är 50 Hz, mellan Mishima och Osaka 60 Hz. På den förstnämnda sträckan har man installerat synkron-synkron omformare från 50 till 60 Hz, från början 2, senare utökat till 5 omformare.¹⁰⁸

För att hålla kontaktledningsspänningen tillräckligt hög produceras reaktiv effekt både vid transformatorstationerna och vid sektioneringspunkterna mellan transformatorstationerna med

¹⁰¹ Fossett, Dave, 2005.

¹⁰² Makino, Shigeki, 1991.

¹⁰³ Makino, Shigeki, 1991.

¹⁰⁴ Sato, Yoshihiko, 1997 och Kitagawa, Takashi, 2005.

¹⁰⁵ Hela stycket baserar på Oura, Yasu, et al. 1998.

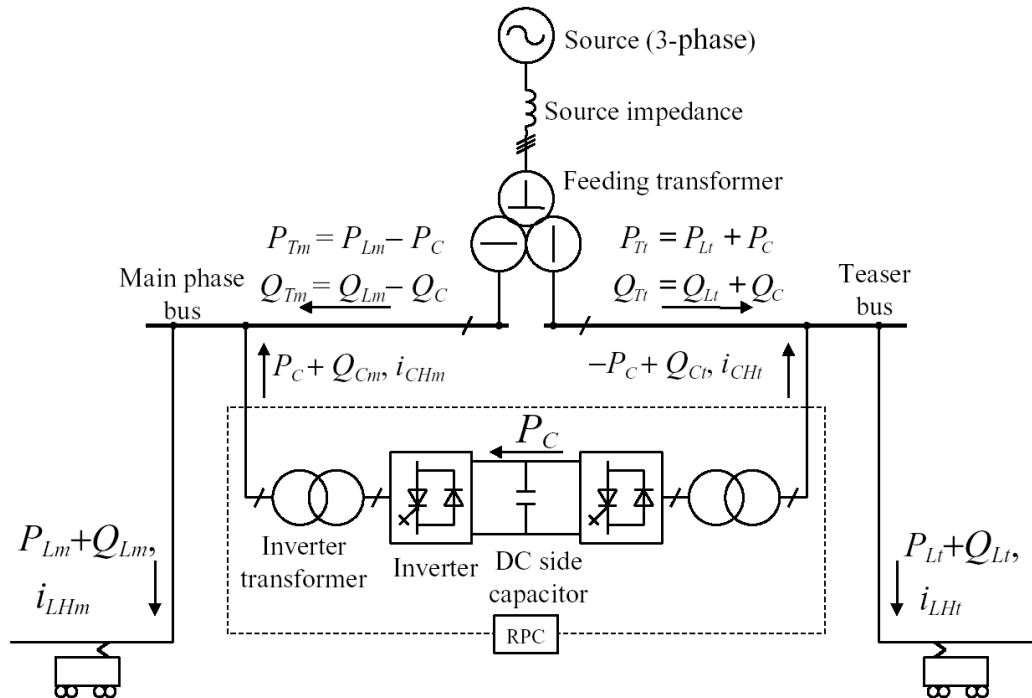
¹⁰⁶ Hela stycket baserar på Oura, Yasu, et al. 1998.

¹⁰⁷ Makino, Shigeki, Edmund Handschin, 1993.

¹⁰⁸ Makino, Shigeki, 1991.

hjälp av styrbar statisk faskompensering (SVC).¹⁰⁹ Bland annat är alla transformatorstationer som matar Tohoku- Shinkansen försedda med RPC, se nedan för beskrivning. Även på sträckan Osaka-Hakata förekommer det att SVC används i sektioneringspunkterna.¹¹⁰

7.1.2.1 Railway static power conditioner (RPC)



Figur 18. RPC i en transformatorstation ¹¹¹

Eftersom belastningen på Shinkansen-sträckorna är mycket hög och framförallt har ökat i takt med att trafikintensiteten ökade har man infört olika system för att kunna ha ett högt effektuttag även om matningen svag eller det nationella elnätet är för svagt vid transformatorstationen.

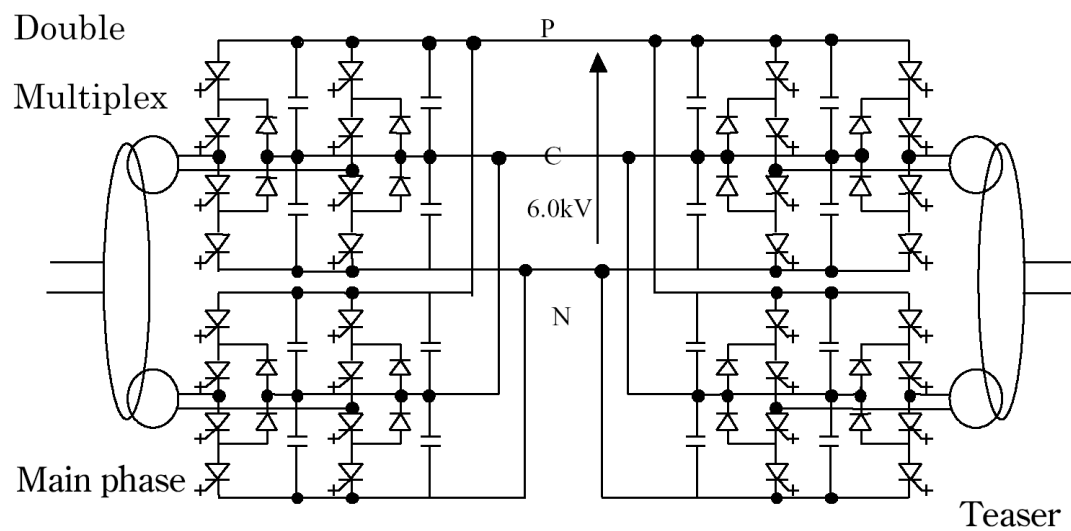
De höga belastningarna förde bland annat med sig problem med för höga osymmetrier och spänningsvariationer på det matande trefasnätet, för att motverka detta konstruerades och installerades utrustning som japanerna kallar för "railway static power conditioner" (RPC) som kan sägas vara en variant av en SVC.

RPC'n är kopplad mellan de två faserna i en transformatorstation där transformatorerna är kopplade i Scott-koppling, det vill säga att RPC'n förbinder huvud- och teaser-transformatorn på sekundärsidan. RPC'ns funktion är att den styr effektflödet mellan huvud- och teaser-transformatorn.

¹⁰⁹ Makino, Shigeki, 1991.

¹¹⁰ Kawahara, Keiji et al. 1997.

¹¹¹ Bild från Uzuka, Tetsuo, Shouji Ikedo, 2004 sid. 65.



Figur 19. Kretsschema RPC

Sedan 2002 finns 20 MVA 60kV RPC i alla transformatorstationer utmed Tohoku-Shinkansen.¹¹²

¹¹² Hela avsnittet baserar på Uzuka, Tetsuo, Shouji Ikedo, 2004 sid. 64-67.

8 Spanien



Figur 20. Spanska höghastighetsnätet med alla utbyggnadsplaner.¹¹³

De blåmarkerade sträckorna är i trafik, de övriga, utom de röda, håller på att byggas och de röda är på olika planerings eller utredningsstadier. Vissa korta avsnitt håller dock på att byggas eller är öppnade för trafik.

I Spanien finns dels det nationella järnvägsnätet med 1668 mm spårvidd, höghastighetsnätet med 1435 mm spårvidd samt ett flertal mindre järnvägsföretag som bland annat trafikerar på smalspår.

RENFE (Red Nacional de los Ferrocarriles Españoles) var det tidigare nationella järnvägsbolaget som ägde och förvaldade infrastrukturen samt bedrev trafiken. Sedan några år tillbaka pågår uppdelningen av RENFE. För att tillmötesgå EU-kraven på att trafik och infrastruktur ska vara separerade skapades GIF (Gestor de Infraestructuras Ferroviarias, på svenska "Förvaltaren av järnvägsinfrastrukturen") 1996, de fick i uppdrag att bygga och förvalta vissa sträckor, bland annat höghastighetsjärnvägarna medan RENFE behöll ansvaret för vissa andra sträckor.¹¹⁴ Första januari 2005 tog ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias) över ansvaret för all järnvägsinfrastruktur och därmed har RENFE endast kvar trafiken. ADIF äger och förvaltar spår och upphandlar största delen av underhållet.¹¹⁵

Höghastighetstrafiken körs av RENFE och ligger inom affärsområdet AVE.

Vid sidan om RENFE finns dels ett fåtal privata järnvägsföretag men framförallt offentligt ägda regionala järnvägsbolag som både förvaltar sin infrastruktur och bedriver trafik. Inga av

¹¹³ Karta från Ministerio de fomento, redigerad av N.B.

¹¹⁴ Smith, Simon, 2004, F1.6-8.

¹¹⁵ ADIF Organización (050629).

dem har dock bredspårssträckor. Störst av dessa är FEVE (Ferrocarriles Españoles de Via Estrecha, på svenska ”Spanska smalspårsjärnvägarna”) de förvaltar och bedriver trafik på smalspårsnätet i norra Spanien.¹¹⁶ Utöver FEVE finns även Euskotren och FGC (Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya)

Total längd RENFE (Bredspår och AVE)	12 828 km
Elektrifierade sträckor (inklusive AVE)	7 510 km
Dubbel- eller flerspårssträckor (inklusive AVE)	3 887 km
Höghastighetssträckor (AVE, normalspår)	1 032 km
Total längd Euskotren (smalspår)	181 km
Elektrifierade sträckor	176 km
Dubbel- eller flerspårssträckor	31 km
Total längd FEVE (smalspår)	1 194 km
Elektrifierade sträckor	265 km
Dubbel- eller flerspårssträckor	72 km
Total längd FGC (smalspår)	184 km
Elektrifierade sträckor	143 km
Dubbel- eller flerspårssträckor	65 km

Tabell 15. Spanska järnvägssystemet^{117 118}

8.1 Höghastighetstrafik

1986 beslöt spanska Regeringen att bygga en ny bredspårig järnvägssträcka från strax söder om Madrid till Córdoba. Sträckningen skulle vara klar till öppnandet av världsutställningen Expo 92 i Sevilla. Oktober 1987 började byggnadsarbetena, i december 1988 ändrades planerna till att sträckan skulle byggas som dubbelspårig normalspårig sträcka mellan Madrid Atocha till Sevilla Santa Justa samt till Expoområdet.

Förfrågningsunderlagen för upphandlingen avsåg antingen befintlig tysk eller fransk teknik, detta för att kunna hålla nere byggtiderna. Loken S252 baserar på tyska BR 120, snabbtågen AVE bygger på franska TGV och mycket av de tekniska installationerna i övrigt är utförda enligt tysk förebild, exempelvis baseras kontaktledningen på tyska varianten Re 250 och ATC-systemet är likaledes tyska LZB (Linienzugbeeinflussung).

Efter endast fyra och ett halvt års byggtid kunde sträckan invigas 1992 som planerat.¹¹⁹

¹¹⁶ Garcia Enseleit, Christian, 2001, sid. 25-27.

¹¹⁷ För RENFE: *Renfe Datos Estadísticos 2001-2002-2003*.

¹¹⁸ För Euskotren, FEVE, FGC: *Erail Monograph*, Spain, sid. 34. Data från UIC, något år äldre än uppgifterna för RENFE.

¹¹⁹ Will, Martin, 1992.

8.1.1 Nätets uppbyggnad

Sträcka	Längd [km]	Sth [km/h] ¹²⁰	Trafikstart ¹²¹
Madrid-Sevilla	471	300	1992
Madrid-Lerida	493	350	2003
Madrid-Toledo	74	350	2005
Lérida-Barcelona	150	350	2006
Córdoba-Málaga	193	350	2007
Madrid-Valladolid / Medina del Campo	170	350	2008

Tabell 16. Spanska höghastighetsnätet¹²²

I första etappen förbinder nätet städerna Sevilla och Madrid, i andra utbyggnadsetappen fortsätter sträckan till Lérida och sedan Barcelona. Det finns också långt fortskridna planer på fler utbyggnader, bland annat till Frankrike.

8.1.2 Fordon

De spanska höghastighetssträckorna trafikeras av 4 olika fordonstyper.

Littera		S 100 ¹²³	S 252 ¹²⁴	S 102 ¹²⁵	S 103 ¹²⁶
Levererade ¹²⁷		1991-1995	1991-1994	2000-	2001-2004
Antal levererade		18	75	1	26
Antal drivenheter		2	Lok	2	motorvagn
Antal mellanvagnar		8	---	12	8+2
Axlar/tåg		26	4	21	32
Varav drivaxlar		8	4	8	16
Längd	m	200		200	200
Egenvikt	t	393	89	i.u.	425
Sittplatser		329	---	i.u.	404
Sth	km/h	300	220	330	350
Effekt/tåg					
AC 25 kV 50 Hz	kW	8 800	5 600	8 000	8 800
DC 3 kV	kW	5 400	5 600	---	---

Tabell 17. Spanska höghastighetsfordon

Till sträckan Madrid-Sevilla beställdes snabbtåg av typen S 100 och lok av typen S 252. När sträckan sedan byggdes ut mot Barcelona köptes nya snabbtåg av typen S 102 och S 103 in.

På samma sätt som med sträckan har man eftersträvat enkelhet även för fordonen, detta gör att fordonen huvudsakligen är varianter av befintliga fordon och inga nyutvecklingar.

AVE / S 100

Första snabbtågstypen kallades AVE och fick littera S 100. Tåget baserar på andra generationens TGV-tåg, TGV Atlantique. Tåget har två Bo'Bo' drivenheter med 8 mellanvagnar däremellan. Endast de båda ändvagnarna vilar på egna boggier, i övrigt har

¹²⁰ Troché, Gerhard, 2005.

¹²¹ År 2005-2008 är planerade trafikstarter och kan komma att försenas.

¹²² Smith, Simon, 2004 tabell F1.

¹²³ Werske, André, *Spanien, AVE Alta Velocidad Española* (050627).

¹²⁴ Siemens Transportation Systems *The EuroSprinter success story* (050628).

¹²⁵ Talgo S.A. *AVE Madrid - Barcelona Talgo 350* (050627).

¹²⁶ Siemens Transportation Systems *High-Speed Train Velaro E* (050627).

¹²⁷ Leveransären är något osäkra på grund av bland annat förseriefordon.

vagnarna jacobsboggier. Högsta axeltryck är 17,2 ton. Tåget drivs av synkronmotorer och är tillverkat av Alstom.

Lok S 252

S 252 är Bo'Bo' lok som baserar på tyska BR 120. Siemens är huvudleverantör. 15 st. är tillverkade med 1435 mm spårvidd för att trafikera höghastighetsnätet, resterande 60 har 1668 mm spårvidd. Loken drar talgo-tåg.

Talgo 350 / AVE S 102

Inför utbyggnaden av AVE-sträckorna beställdes nya fordon. Förseriefordonet har sth 350 km/h, men tågens sth i kommersiell trafik är 330 km/h. 16 tåg är beställda med option på ytterligare 26-40 st. Tåget har en konventionell Bo'Bo' drivenhet med asynkronmotorer i varje ände, däremellan är vagnarna av Talgo-typ med enkelaxlar. Största axeltryck är 17 ton.

Velaro E (AVE S 103)

Velaro E är en variant av tyska ICE 3 och tillverkas av Siemens. Tåget är ett motorvagnståg med drivning på alla axlar i hälften av vagnarna. Axeltryck 16 ton. 2001 beställdes 16 tåg och 2004 ytterligare 10 tåg.¹²⁸

8.1.3 Banmatning

Spaniens järnvägar är elektrifierade med 3 kV DC. Nedanstående beskrivning av höghastighetssträckornas banmatning beskriver endast sträckan Madrid-Sevilla men även vid banmatningen av övriga sträckor har låga investeringskostnader varit viktiga.

1988 uppdrog spanska statsjärnvägarna RENFE åt Deutsche Eisenbahn-Consulting GmbH att dimensionera banmatningen för hela sträckan Madrid – Sevilla samt att skriva de tekniska delarna i anbudsunderlagen.

De givna förutsättningarna från RENFE's sida var bland annat att matningsspänningen skulle vara 25 kV 50 Hz men stationerna i Sevilla och Madrid skulle ha kontaktledningsspänningen 3 kV DC för att man bland annat befarade störningar från 25 kV 50 Hz. Kraven var också höga såtillvida att två multipelkopplade höghastighetståg skulle kunna trafikera sträckan i 5-minuters-trafik åt båda hållen i maximala hastigheten 300 km/h utan att banmatningssystemet begränsade trafiken. Vidare skulle osymmetrin i det matande nätet hållas låg och störningar på t.ex. telefonledningar skulle vara så låga som möjligt. Spårvidden skulle vara 1435 mm.¹²⁹

I samband med byggnaden av sträckan Madrid-Lérida-Barcelona beslöts att höja kontaktledningsspänningen till 25 kV 50 Hz i de två 3 kV DC avsnitten eftersom det bland annat skulle förenkla fordonsanskaffningen avsevärt, hittills hade fordonen varit tvungna att vara utförda som tvåsystemfordon, men även minska underhållskostnaderna för kontaktledningsanläggningen. Omställningen ägde rum under 2002, bland annat fick större förändringar i kontaktledningsanläggningen göras. Några extra transformatorstationer behövdes däremot inte. Fortfarande finns 3 kV DC kvar på stationerna eftersom spanska bredspåret är elektrifierat med denna spänning.¹³⁰

8.1.3.1 Matningsstationerna

Vid konstruktionen av matningsstationerna var enkel uppbyggnad ett grundkrav, detta gjorde att ett system med autotransformatorer inte kom ifråga, återledningen är endast utförd som återledare som är upphängda i kontaktledningsstolparna.¹³¹ Alla transformatorstationer är i

¹²⁸ Werske, André, *Der spanische Velaro E von Siemens, das ICE 3 – Derivat* (050627).

¹²⁹ Will, Martin, 1991 sid. 71.

¹³⁰ Vega, Tomás, 2003 sid. 134-135.

¹³¹ Kießling, Friedrich et al, 2004 sid. 113.

huvuddrag likadana och med samma komponenter, bara i en station förekommer 3 i stället för vanligtvis två transformatorer. Transformatorerna är parallellkopplade och varje transformatorstation är endast ansluten till två faser av det nationella trefasnätet. Någon V-koppling av transformatorerna förekommer alltså inte. Däremot är transformatorstationerna anslutna mellan olika faser för att minska snedbelastningen på trefasnätet. Mellan transformatorstationerna är nollspänningssektioner eftersom kontaktledningsspänningen ändrar fasläge mellan varje matningsstation.

Lasten i varje transformatorstation är uppdelad på två transformatorer, vid fel på en transformator kan planenliga järnvägsdriften fortsätta utan inskränkningar. Dock begränsas möjligheten att köra 5-minuters-trafik med 2 multipelkopplade tågsätt.

Den installerade totala effekten beräknades till 500 MVA. Målet var att hålla antalet transformatorstationer så lågt som möjligt, dock fick å andra sidan avståndet dem emellan inte bli så stort att fortsatt drift vid fel på en transformatorstation hindrades. Totalt installerades 12 transformatorstationer med 2 st. 20 MVA transformatorer i varje, utom i en där tre installerades.

I normalfall är utnyttjandegraden på utrustningen mycket låg eftersom den är så överdimensionerad för att kunna klara av den intensiva trafiken efter en trafikstörning.

Nr.	Namn	Km	Avstånd till nästa transf. transf.stn.	Antal	Effekt [MVA]	Inkommande spänning [kV]	Avstånd till linjen [km]
1	El Hornillo	18,7	35,2	3	60	220	0,3
2	Añover	53,9	35,9	2	40	220	3,5
3	Mora	89,9	39,0	2	40	220	7,2
4	El Emperador	129,7	44,6	2	40	220	5,6
5	Ciudad Real	174,3	39,1	2	40	220	18,3
6	La Nava	213,4	31,2	2	40	220	1,6
7	Venta de la Inés	244,6	49,8	2	40	220	16,3
8	Arroyo del Valle	294,4	39,6	2	40	220	2,5
9	La Lancha	334,0	43,5	2	40	220	1,2
10	Posadas	377,5	38,7	2	40	132	0,2
11	Lora del Rio	416,2	41,9	2	40	132	0,3
12	La Rinconeda	458,1		2	40	132	0,1

*Tabell 18. Transformatorstationer för sträckan Madrid-Sevilla¹³²
El Hornillo ligger närmast Madrid, La Rinconeda vid Sevilla.*

Vid placeringen av transformatorstationerna var de viktigaste kriterierna att varje station inte skulle behöva mata en längre sträcka än 20 km åt varje håll och dess läge skulle vara så nära de platser på sträckan där hög effekt förbrukades. Vidare skulle de ligga nära lämpliga högspänningsledningar.

Transformatorstationen El Hornillo har tre transformatorer eftersom dess belastning är högre för att många tåg står uppställda i Madrid under spänning och förbrukar effekt för bland annat kylning. Förstärkningsledningar förekommer inte alls.

Effekten per kilometer blir drygt 1 MVA, det ligger i paritet med de lägre belastade TGV-linjerna.

¹³² Garcia Enseleit, Christian, sid. 39.

Spaniens ambition att hålla kostnaderna låga har lyckats väl, givetvis spelar det en stor roll att landet är glest befolkat

Land	Kostnader per kilometer, miljoner US \$
Frankrike, Spanien	10
Belgien, Tyskland	15
Italien	25
Korea	35
Taiwan	37
Holland	53
Storbritannien	74

Tabell 19. Byggekostnader per kilometer för höghastighetslinjer¹³³

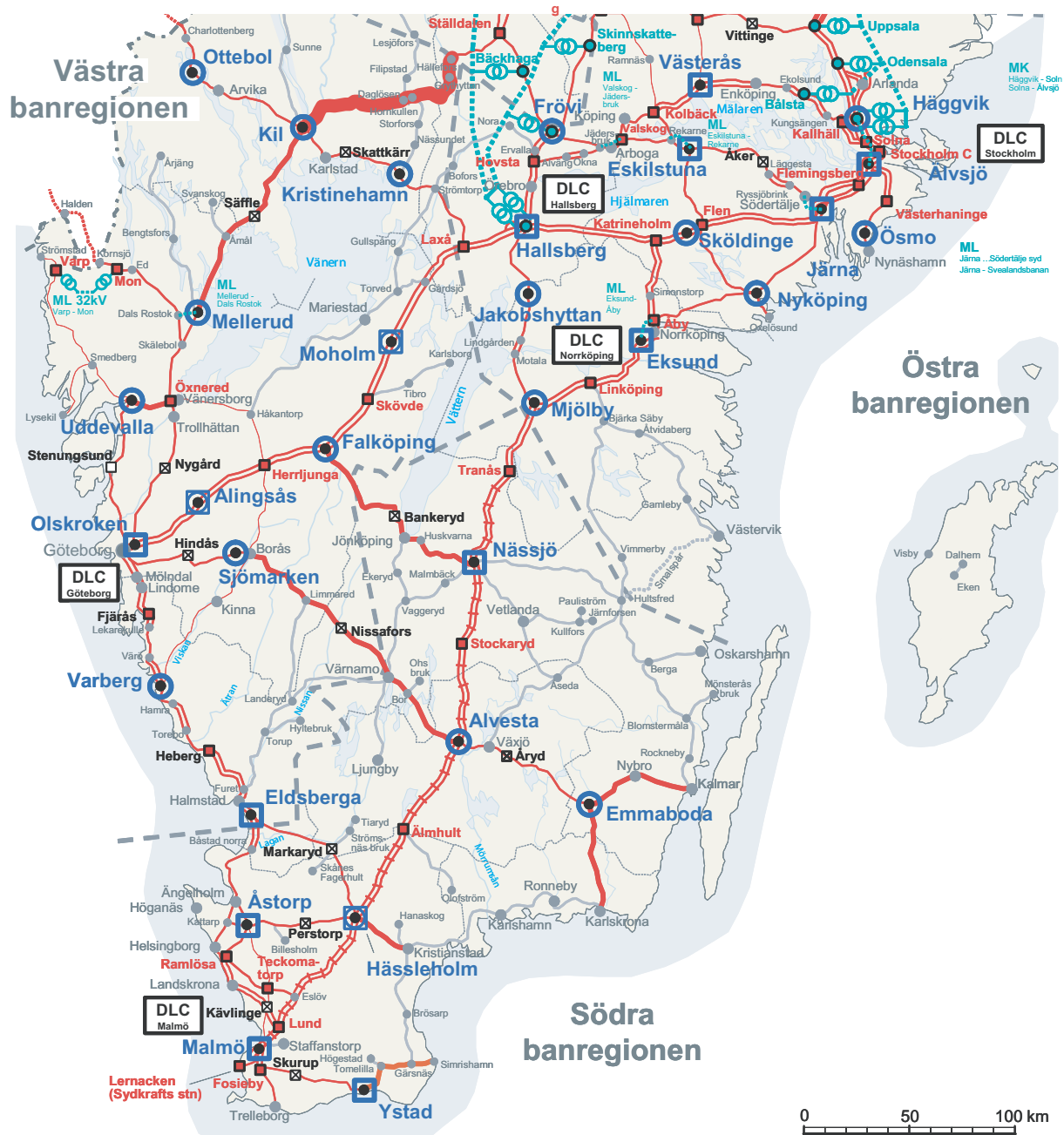
¹³³ Arduin, Jean-Pierre, Jincheng Ni, 2005 sid. 22.

9 Sverige

Sverige har ingen höghastighetstrafik i dagsläget, högsta förekommande hastighet är 200 km/h. Däremot är vissa nya sträckor byggda för högre hastigheter.

9.1.1 Jämförelse med sträckorna Stockholm-Göteborg/Malmö

Som jämförelse har sträckorna Stockholm-Göteborg och Stockholm-Malmö valts, detta eftersom dessa är mest intressanta att komplettera med en höghastighetsbana.



Figur 21. Karta över matningsstationer¹³⁴

¹³⁴ Friman, Edward, Håkan Kols, 2005.

Tabellen nedan listar samtliga matningsstationer på sträckan Stockholm – Göteborg, dvs. matningsstationerna Älvsjö - Olskroken och samtliga matningsstationer på sträckan Stockholm – Malmö, dvs. matningsstationerna Älvsjö – Sköldinge - Malmö.

Plats ¹³⁵	Antal aggregat ¹³⁶	Kontinuerlig effekt [MVA]	Maximal effekt [MVA]	Avstånd till nästa [km] ¹³⁷
Häggvik	5·10 ¹³⁸	50	70	22
Älvsjö	4·15	60	60	39
Järna	3·14	42	42	71
Sköldinge	2·5,8+1·3,2	14,8	20,8	80
Hallsberg	2·15	30	30	87
Moholm	2·15+1·10	40	44	57
Falköping	3·5,8	17,4	24	69
Alingsås	2·14 ¹³⁹	30,4	32,8	43
Olskroken	2·15+3·5,8+1·3,2	50,6	58,8	
Sköldinge	2·5,8+1·3,2	14,8	20,8	68
Eksund ¹⁴⁰	2·15	30	30	74
Mjölby	1·10+1·5,8+3·3,2	25,4	36,4	89
Nässjö	2·15+1·14	44	44	87
Alvesta	2·10+1·5,8	25,8	36	98
Hässleholm	2·14+1·10	38	42	83
Malmö	3·15	45	45	

Tabell 20. Matningsstationer utmed sträckorna Stockholm-Göteborg och Stockholm Malmö

Häggvik ligger norr om Stockholm och hör egentligen inte till de aktuella sträckorna men har tagits med för att komplettera matningen kring Stockholm samt att den är förbunden via en 15 kV kabel sträckan Häggvik-Solna-Älvsjö. Matningsstationernas utförande är mycket varierande, det förekommer ett flertal olika typer av omformare och omriktare. Vidare kompliceras framställningen av att omformarna kan överlastas kraftigt under en längre tid, se kolumn ”Maximal effekt i MVA” till skillnad från omriktarna vars nominella uteffekt i princip inte kan överskridas.

De omformare som används är:

	Kontinuerlig effekt ¹⁴¹	Maximal effekt
Q24	3,2 MVA	4,8 MVA
Q38	5,8 MVA	8 MVA
Q48	10 MVA	14 MVA

Tabell 21. Roterande omformare i svenska matningsstationer

Den maximala effekten kan avges under 6 minuter.

¹³⁵ Friman, Edward, Håkan Kols, 2005.

¹³⁶ Enligt e-post från Edward Friman på Banverket 050617.

¹³⁷ Avstånd beräknade med <http://www.tydal.nu/article/77> 050617.

¹³⁸ Stationen kan köras med 4 aggregat och fortfarande mata ut full effekt, en del av effekten tas då från 132 kV nätet.

¹³⁹ I Alingsås står även en Q 24 som dock inte är i drift.

¹⁴⁰ Närmaste trafikplats är Fiskeby.

¹⁴¹ Genom moderniseringar höjdes kontinuerliga effekten från tidigare 2,4 MVA (Q 24) och 4 MVA (Q 38). Den maximala effekten ändrades inte.

Omriktarnas effekt är 14-15 MVA beroende på typ. Återledningen är genomgående utförd med sugtransformatorer. Inget kontaktledningsavsnitt matas från transformatorer.

Att räkna ut installerad effekt per kilometer ter sig svårare för dessa avsnitt då matningsstationerna inte uteslutande matar aktuella sträckor utan även andra avgrenande linjer, vidare är trafiken mycket blandad.

9.1.2 Uppskattning av effekttågång för Ostlänken

Ostlänken är en ny dubbelspårig järnväg som man planerar att bygga mellan Järna och Linköping. Syftet är att öka kapaciteten och resehastigheten. Beroende på sträckning kommer dess längd att bli cirka 150 km.

Flera trafikeringsalternativ har tagits fram för att analysera Ostlänkens kapacitet. Dessa alternativ bygger alla på att blandade tågtyper samsas på banan, det vill säga att både höghastighetståg, snabbtåg, Intercitytåg och regionaltåg kan komma att trafikera banan.

9.1.3 Beräkningsmodell

För att få en mycket grov uppskattning av effekttågången för höghastighetståg är en möjlighet att anta att tågens effektförbrukning är kontinuerlig maxeffekt inklusive förluster i traktionsutrustningen samt ytterligare något för hjälpkraft mm.

Modellen stämmer bäst för höghastighetståg där fordonen kör med maximal hastighet. Givetvis går det att utgå ifrån andra tågtypers effekter och göra motsvarande överslagsberäkningar men noggrannheten blir sämre för tåg som har täta uppehåll och som inte nyttjar sin maximala effekt kontinuerligt. För sådana fall skulle simuleringar med olika tidtabellsalternativ och tågmodeller behövas.

En överslagsberäkning visar att effektbehovet stämmer tämligen väl för Frankrikes TGV-linjer, då dessa är sträckor där renodlad höghastighetstrafik bedrivs med en tågtyp.

För en förenklad beräkning är utgångspunkten att sträckan trafikeras av en enda tågtyp, detta fall har TGV Réseau valts, detta eftersom tillgången på data är god. Effekten är 8,8 MW för ett tågsätt, upptagen effekt från kontaktledningen antas vara 10 MVA, där är hänsyn taget till förluster i traktionsutrustningen och extra effektförbrukningen för hjälpkraft. $\cos \phi$ för fordonen är ≈ 1 och sth är 300 km/h.

I utredningsalternativ röd för Ostlänken finns 4 tågtyper med sth mellan 200 och 320 km/h och olika uppehållsmönster med. Antalet höghastighetståg (sth 300)¹⁴², snabbtåg (sth 250), intercity (sth 250, tätare uppehåll) uppgår till vardera 4 i timmen, två tåg i timmen utgörs av regionaltåg (sth 200).¹⁴³

En förenkling är att anta att trafiken utgörs av totalt 10 tåg i timmen, 5 i vardera riktningen.

300 km/h är 5 km/minut. Vid 10 tåg i timmen fås ett tåg per 30 km. Effektbehovet blir därmed 1/3 MVA/km. För hela Ostlänken med en ungefärlig längd av 150 km ger detta ett effektbehov av 50 MVA.

Dagens bana via Nyköping är endast enkelspårig och därför förhållandevis glest trafikerad, dagens snabbtåg går via Katrineholm. I omformarstationen i Nyköping står två Q38, den utmatade effekten är således $2 \cdot 5,8 = 11,6$ MVA kontinuerligt eller 16 MVA kortvarigt.¹⁴⁴

¹⁴² I *Kapacitetsanalys av Ostlänken, delrapport 2*, 2004 sid. 18 är hastigheten planerad till 320 km/h, eftersom dock TGV Réseau valts som tågtyp i denna rapport har sth valts till 300 km/h.

¹⁴³ Banverket, *Kapacitetsanalys av Ostlänken, delrapport 2*, 2004.

¹⁴⁴ Jansson, Greger, 2005

Som jämförelse matas denna sträcka via Katrineholm av tre matningsstationer idag, Järna, Sködinge och Eksund, där dock Järna även försörjer den täta pendeltågstrafiken och Svealandsbanan mot Eskilstuna. Deras sammanlagda effekt är 86,8 MVA, eftersom Sködinge har roterande omformare är denna kortvarigt överbelastningsbar, den maximala effekten är totalt 92,8 MVA för hela sträckan.

9.2 Slutsats

Studien är endast en översiktlig genomgång av befintliga system, för att kunna göra dra mer detaljerade slutsatser skulle mer ingående studier av länders banmatningssystem behövas.

Studien visar att den helt dominerande matningen utgörs av 25 kV med nätfrekvens och utan kraftelektronik för spänningshållning eller symmetrering, endast i ett fåtal fall används kraftelektronik i matningsstationerna. De argument som framförs till fördel för 16 2/3 Hz förefaller inte vara av sådan vikt att de påverkar utformningen av nya banmatningssystem, sådana med andra matningsspänningar eller frekvenser förekommer hittills bara i anslutning till äldre befintliga system.

Studien ger en indikation om att effektbehovet för Ostlänken kommer att, med internationella mått mätt, vara mycket lågt. Även om trafiken blir blandad och väsentligt tätare än i föregående avsnitt antaget kommer effektbehovet fortfarande att vara lägre än det för de mindre trafikerade sträckorna på kontinenten. En avgörande faktor är att det utomlands ofta körs med multipplekopplade tågsätt i stället för som ovan antaget ett enkelt tågsätt. Däremot kommer effektbehovet att öka avsevärt jämfört med idag.

TGV har ett effektbehov av mellan 0,8-2,0 MVA per kilometer. I Spanien är den beräknade och installerade effekten 1 MVA per kilometer, behovet är dock lägre, i stället har man valt att överdimensionera anläggningen för att få en bra redundans vid störningar.

Att mata via transformatorer har fördelen att en överdimensionering av kapaciteten kostar förhållandevis lite. Dock avser de angivna effekterna endast transformatorernas effekt, inte vilken effekt transformatorstationerna kan mata ut till kontaktledningen.

Att generellt dra slutsatser om hur stark banmatningen är genom att titta på matningsstationernas effekt kan vara vanskligt då det, framförallt när de handlar om rena transformatorstationer, kan vara önskvärt att standardisera de ingående komponenterna så långt som möjligt, till exempel att använda samma transformatortyp även om denna skulle klara av högre effekt än vad det matande nätet är dimensionerat för.¹⁴⁵ I vissa fall är det detta som begränsar effekten som stationen klarar att mata ut. För omriktar- och omformarstationer är det dock vanligtvis själva omformaren eller omriktaren som är begränsningen eftersom dessa kostar mycket mer än transformatorer.

Vidare kan konstateras att höghastighetstrafiken befinner sig i en stark utbyggnadsfas, på mindre än ett decennium har det byggts fler kilometer höghastighetssträckor än vad som byggdes under perioden 1965-1995. Sannolikt kommer antalet kilometer höghastighetssträcka som färdigställs de kommande 10 åren att vara mer än allt som byggts dessförinnan. I princip alla dessa sträckor elektrifierats med 25 kV 50 Hz.

¹⁴⁵ Courtois, Christian, epost juni 2005.

10 Källor

10.1 Tryckta källor

- Arduin, Jean-Pierre, Jincheng Ni, *French TGV Network Development* Japan Railway & Transport Review 40, March 2005 sid. 22-28.
- Banverket, Östra banregionen, *Kapacitetsanalys av Ostlänken, delrapport 2: UA Röd och UA Blå*, Sundbyberg 2004.
- Braun, Andreas, *DB-Fahrzeuge Lokomotiven und Triebwagen der Deutschen Bahn*, (München: GeraMond Verlag, 1997).
- Braun, Erich, D. Klumpp, *Energieversorgung der Neubaustrecke Madrid-Sevilla, Teil II. Ausführung* Elektrische Bahnen 89 (11/1991) sid.389-390.
- Braun, Erich, Hugo Kister, *Systemtrennstellen auf der Schnellfahrstrecke Madrid-Sevilla*. Elektrische Bahnen 92 (8/1994) sid.229-233.
- Brauner, Günter, *Bahnenergieversorgung mit 16 2/3 Hz oder 50 Hz im vergleich*. Elektrische Bahnen 94 (1-2/1996) sid. 10-13.
- Chen T.H. mfl., *Network modelling of traction substation transformers for studying unbalance effects*, IEE Paper 1592 September 1994 IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol.142, No. 2, March 1995.
- Chun-Hwan, Kim *Transportation Revolution: The Korean High-speed Railway* Japan Railway & Transport Review 40, March 2005 sid. 8-13.
- Courtois, Christian, *Bahnenergieversorgung in Frankreich* Elektrische Bahnen 92 (6/1994) sid. 167-170.
- Courtois, Christian, *Bahnenergieversorgung in Frankreich Teil 2* Elektrische Bahnen 92 (7/1994) sid. 202-205.
- Ebhart, Stefan mfl., *Schaltungsaufbau im 16,7-Hz-Oberleitungsnetz bei DB Netz*, Elektrische Bahnen 102 (4/2004) sid.152-163.
- Erail Monograph, Spain*, (NEA Transport and research training Rijswijk, Holland 2003)
- Fried, Domenic, Bernhard Braun, *Hochgeschwindigkeitstriebkopf Talgo 350 Vorserie*. Elektrische Bahnen 100 (4/2002) sid. 141-152.
- Friman, Edward, Håkan Kols, *Allmän beskrivning av kraftförsörjningssystem för Järnvägen i Sverige, EL-DOKUMENT EL 03-57 Rev B* (Banverket 2005).
- Fröjd, Oskar mfl., *Kompendium i Tågtrafikplanering*, tredje upplagan (Järnvägsgruppen KTH. Stockholm 2003).
- Garcia Enseleit, Christian, *Der spanische Hochgeschwindigkeitsverkehr – Strecke, Betrieb, Wirtschaftlichkeit -*, (Technische Universität Berlin, Institut für Land- und Seeverkehr, Berlin 2001).
- Gutt, H.-J., *Aufwandsarme, vollständige Symmetrierung von 50 Hz Einphasen-Bahnlasten* Elektrische Bahnen 89 (11/1991).
- High speed, Rail's leading asset for customers and society* UIC 2005 (Broschyr).
- Hirakawa, M., *Self-commutated SVC for electric Railways*, IEEE Catalogue No. 95TH8025, IEEE 1995.
- Hochgeschwindigkeitsverkehr in Frankreich* Elektrische Bahnen 100 (1-2/2002) s. 60-67. [anonym] [Berichtigung in: Elektrische Bahnen 100 (6/2002) s. 206].
- Huot, Eric, *Development of the French High-Speed Network as a Base of Ideas for the Future Scandinavian Network*, (KTH, Department of Traffic and Transport Planning, Stockholm 2001).
- Kawahara, Keiji mfl., *Compensation of Voltage Drop Using Static Var Compensator at Sectioning Post in AC Electric Railway System*, PCC-Nagaoka, IEEE 1997.

- Kießling, Friedrich mfl., *Verwendung von Bahnrückstromleitern an der Schnellfahrstrecke Madrid-Sevilla* Elektrische Bahnen 92 (4/1994).
- Kitagawa, Takashi, *Extending the Shinkansen Network* Japan Railway & Transport Review 40, March 2005 sid 14-17.
- Kommissionens beslut av den 30 maj 2002 om teknisk specifikation för driftskompatibilitet hos delsystemet "Energiförsörjning" i det transeuropeiska järnvägssystem för höghastighetståg som avses i artikel 6.1 i direktiv 96/48/EG. (2002/733/EG).
- König, Ulrich mfl., *Elektrischer Betrieb bei der Deutschen Bahn im Jahre 2003*, Elektrische Bahnen 102 (1-2/2004) sid. 5-39.
- König, Ulrich mfl., *Elektrischer Betrieb bei der Deutschen Bahn im Jahre 2001*, Elektrische Bahnen 100 (1-2/2002) sid. 4-37.
- Leloup, Alain, *Bahnenergieversorgung der Hochgeschwindigkeitszüge in Frankreich* Elektrische Bahnen 93 (8/1995) sid. 257-258.
- Linder, Christian, Reinhard Heinze, *Umstellung der Sollfrequenz im zentralen Bahnstromnetz von 16 2/3 Hz auf 16.70 Hz*, Elektrische Bahnen 100 (12/2002) sid. 447-454.
- von Lingen, Jörg, Peter Schmidt, *Hochgeschwindigkeitsverkehr und Bahnenergieversorgungssysteme*, Elektrische Bahnen 95 (1-2/1997) sid. 12-20.
- Lundberg, Rune, *Lärobok i elektroteknik för Statens Järnvägars personal Del IV Omformarstationer*, (Järnvägsstyrelsen, Stockholm 1959).
- Lönard, Detlef, Jens Northe, Dorman Wensky, *Statische Bahnstromumrichter – Systemübersicht ausgeführter Anlagen* Elektrische Bahnen 93 (6/1995) sid. 179-190.
- Makino, Shigeki, *The project of power supply system reinforcement of Tokaido-Shinkansen* Elektrische Bahnen 89 (11/1991) sid. 75-76.
- Makino, Shigeki, Edmund Handschin, *Betrieb und Energieversorgung der Tokaido-Shinkansen-Linie* Elektrische Bahnen 91 (9/1993) sid. 297-300.
- Menuet, Jean-Pierre, *Panorama des installations existantes et perspectives pour le futur*, Revue Générale des Chemins de Fer, Numéro spécial Alimentation électrique. 1ère partie avril 2001.
- Oura, Yasu mfl., *Railway Electric Power Feeding Systems*, Japan Railway & Transport Review 16, June 1998 sid. 48-58.
- Réseau Ferré de France, *Annual Report 2003*.
- Rådets direktiv 96/48/EG av den 23 juli 1996 om driftskompatibiliteten hos det transeuropeiska järnvägssystemet för höghastighetståg. Europeiska gemenskapernas officiella tidning nr L 235 , 17/09/1996 s. 0006 – 0024.
- Sato Yoshihiko, *Neue Hochgeschwindigkeitszüge der East Japan Railway Company* Elektrische Bahnen 95 (7/1997) sid. 188-198.
- Schaffer, Heinz-Herbert, *Ortsfeste Anlagen der elektrischen Zugförderung*, 2. Auflage (Josef Keller Verlag, Starnberg 1967).
- Schönfisch, Jochen, *Hochgeschwindigkeitszüge in Frankreich* Elektrische Bahnen 100 (1-2/2002) sid. 68-74.
- Schmidt, Rainer, *Der Standardumrichter bei der Deutschen Bahn*. Elektrische Bahnen 101 (4-5/2003) sid. 177-181.
- Steimel, Andreas, *Elektrische Triebfahrzeuge und ihre Energieversorgung* (Oldenbourg Industrieverlag, München 2004).
- Terada, Kazushige *Railways in Japan – Public & Private Sectors* Japan Railway & Transport Review 27, June 2001 sid. 48-55.
- Uzuka, Tetsuo, Shouji Ikedo, *Railway Static Power Conditioner Field Test* Quaterly Report of RTRI, Vol. 45, No. 2, May 2004 sid. 64-67 http://www.jstage.jst.go.jp/article/rtriqr/45/2/64/_pdf (050629).

Uzuka, Tetsuo, Shouji Ikeda, Keiji Ueda, *A static Voltage Fluctuation Compensator for AC Electric Railway*, 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004. *Förefaller vara samma artikel som ovan men med andra bilder.*

UIC International Railway Statistics 2002.

Vega, Tomás, *Schnellfahrstrecke Madrid-Sevilla durchgehend mit AC 25 kV 50 Hz betrieben* Elektrische Bahnen 101 (3/2003) sid. 134-135.

Will, Martin, *Energieversorgung der Neubaustrecke Madrid-Sevilla, Teil I. Auslegung der Bahnstromversorgung* Elektrische Bahnen 89 (11/1991) sid. 71-72.

Will, Martin, *Eröffnung der Hochgeschwindigkeitsstrecke Madrid-Córdoba-Sevilla.* Elektrische Bahnen 90 (5/1992) sid. 163-168.

Östlund, Stefan, *Elektrisk Traktion*, (Järnvägsgruppen KTH, Institutionen för Elektrotekniska system, Stockholm 2002).

10.2 Webkällor

ADIF Organización <http://www.adif.es/index2.html> (050629).

Alstom *The High Speed Rail System in Korea*, Alstom 2004
http://www.webmag.transport.alstom.com/eMag/externe/international/korea/ktx/mar2004/1/_files/file_225_39190.pdf (050628).

Channel Tunnel Rail Link *Introduction and Benefits*
<http://www.ctrl.co.uk/introduction/default.asp?L=2&SL=5> (050629).

China Academy of Railway Sciences *Wuchang-Guangzhou line will commence construction within the year and Guangzhou-Beijing travel time will only take 10 hours by 2010 5. augusti 2004* <http://cars.rails.com.cn/2j/news/mj.asp?num=297> 050629.

Deutsche Bahn AG *Aus- und Neubaustrecke Nürnberg - Erfurt - Leipzig/Halle – Berlin 2005*
http://www.db.de/site/bahn/de/unternehmen/bahnwelt/bauprojekte/vde/nuernberg__erfurt__leipzig__berlin.html (050629).

Deutsche Bahn AG *Die Neubaustrecke Köln - Rhein/Main 2005*
http://www.db.de/site/bahn/de/unternehmen/bahnwelt/bauprojekte/abgeschlossen/koeln__rhein__main.html (050629).

Deutsche Bahn AG *Neu- und Ausbaustrecke Nürnberg - Ingolstadt – München 2005*
http://www.db.de/site/bahn/de/unternehmen/bahnwelt/bauprojekte/ausbau__neubau/nuernberg__ingolstadt__muenchen.html (050629).

Deutsche Bahn AG *Neubaustrecke Erfurt - Leipzig/Halle Streckenkarte*
http://www.db.de/site/shared/de/dateianhaenge/infomaterial/bauprojekte/bauprojekte__erfurt__leipzig__streckenkarte.pdf (050629).

Deutsche Bahn AG *Neubaustrecke Stuttgart – Ulm 2005*
http://www.db.de/site/bahn/de/unternehmen/bahnwelt/bauprojekte/ausbau__neubau/stuttgart__ulm.html (050629).

Fossett, Dave *Scheduled Shinkansen Top Speeds*
<http://www.h2.dion.ne.jp/~dajf/byunbyun/speeds/schedule.htm> (050924).

HSL-Zuid *HSL-Zuid Kernfeiten* <http://www.hslzuid.nl/hsl/hslzuid/kernfeiten/index.jsp> (050629).

HSR St.Petersburg – Moscow http://www.vsm.ru/e_vsm.htm (050629).

Ministerio de Fomento <http://www.fomento.es/>.

People's Daily Online *China opens railway equity to foreign investors 23. juni 2005*
http://english.people.com.cn/200506/23/eng20050623_191968.html (050629).

People's Daily Online *Rail track beats Maglev in Beijing-Shanghai High Speed Railway Beijing 18 januari 2004*
http://english.peopledaily.com.cn/200401/16/eng20040116_132743.shtml (050629).

Renfe *Datos Estadísticos 2001-2002-2003*

http://www.renfe.es/empresa/pdf/estadisticas/triptico_2001_2002_2003.pdf (050629).

Siemens Transportation Systems *High-Speed Train Velaro E* Siemens broschyr A19100-V800-B720-X-7600 <http://references.transportation.siemens.com/refdb/showReference.do?r=332&div=7&l=en> (050627).

Siemens Transportation Systems *References The EuroSprinter success story*

<http://www.transportation.siemens.com/ts/en/pub/products/lm/products/eurosprinter/refs.htm> (050628).

Siemens *Transrapid Shanghai, Shanghai, China*

<http://references.transportation.siemens.com/refdb/showReference.do?r=320&div=8&l=en> (050629).

Smith, Simon *High Speed Rail: International Comparisons Final Report* Steer Davies Gleave februari 2004 <http://www.cfit.gov.uk/hsr/index.htm> (050629) February 2004.

Taiwan High Speed Rail Corporation *Construction Project Overview*

<http://www.thsrc.com.tw/emain/construct/construct.asp?aa=overview/01.asp> (050628).

Taiwan High Speed Rail Corporation *Electrification System*

http://www.thsrc.com.tw/emain/construct/core/Electrification_System.htm (050628).

Takahashi, Kosuke *Sweating bullets over new Chinese train* Asia Times Online, Shanghai 2004 <http://www.atimes.com/atimes/China/FE13Ad01.html> 050629.

Talgo S.A. Madrid *AVE Madrid - Barcelona Talgo 350* http://www.talgo.com/pdf/ave_01.pdf (050627).

TAV *High speed lines* <http://www.en.tav.it/1/default.asp?id=1> och undersidor. (050628).

TAV RFI – *Rete Ferroviaria Italiana*

<http://www.en.tav.it/2/default.asp?id=951&codice=2&codice1=004&codice2=008> (050628).

Werske, André *Der spanische Velaro E von Siemens, das ICE 3 – Derivat*

http://www.hochgeschwindigkeitszuege.com/spain/inhalt_velaro.htm (050627).

Werske, André *ICE Streckennetz 2005*

http://www.hochgeschwindigkeitszuege.com/germany/index_ice_strecken.htm (050629).

Werske, André *Spanien, AVE Alta Velocidad Española*

http://www.hochgeschwindigkeitszuege.com/spain/inhalt_ave.htm (050627).

Werske, André *TGV - Liniennetz 2005*

http://www.hochgeschwindigkeitszuege.com/france/index_tgv_strecken.htm (050629).

10.3 E-post eller muntliga källor

Bäckström, Göran, Stockholm. Göran har på fritiden sammanställt omfattande data om japanska järnvägsnätet med bland annat japansk järnvägslitteratur som källor.

Courtois, Christian, Power supply division manager, department of fixed installations for electric traction. SNCF.

Friman, Edward, Banverket Elkraftanläggning, Borlänge.

Jansson, Greger, Banverket Elkraftanläggning, Borlänge.

Troché Gerhard, Forskningsingenjör/Tågtrafik, Institutionen för Transporter och samhällsekonomi, Avdelningen för Trafik och logistik, KTH, Stockholm.

10.4 Övriga källor

Till dessa finns inga referenser i arbetet men de har använts som bakgrundsinformation och ger en fördjupning i ämnet.

Courtois, Christian, Carpentier Elie, Electrification & power supply. *Practicalities of upgrading existing lines for increased capacity and higher speeds*. SNCF Paris 1998.

- Courtois, Christian, J.L. Pouliquen, *Series Capacitor Banks for the TGV Paris Lyons Line*, SNCF Direction de l'équipement et de l'aménagement 1997.
- Revue Générale des Chemins de Fer, Numéro spécial Alimentation électrique. 2ème partie juillet/août 2001.
- Revue Générale des Chemins de Fer, Numéro spécial Alimentation électrique. 1ère partie avril 2001.
- Roussel, H., *Power supply for the Atlantic TGV High speed line*, SNCF France [okänt år].
- Schulze, Jens, *Neuartige und weiterentwickelte Bahnsysteme I, Bahnenergieversorgung*, (Technische Universität Berlin, Betriebssysteme elektrischer Bahnen, Institut für Land- und Seeverkehr) Föreläsningskompendium 2002/2003.
- Schulze, Jens, *Neuartige und weiterentwickelte Bahnsysteme I, Bahnrückstromführung*, (Technische Universität Berlin, Betriebssysteme elektrischer Bahnen, Institut für Land- und Seeverkehr) Föreläsningskompendium 2001/2002.
- Schulze, Jens, *Neuartige und weiterentwickelte Bahnsysteme I, Bahnstromsysteme*, (Technische Universität Berlin, Betriebssysteme elektrischer Bahnen, Institut für Land- und Seeverkehr) Föreläsningskompendium 2001/2002.
- Schulze, Jens, *Neuartige und weiterentwickelte Bahnsysteme I, Fahrleitungssysteme*, (Technische Universität Berlin, Betriebssysteme elektrischer Bahnen, Institut für Land- und Seeverkehr) Föreläsningskompendium 2001/2002.