

CHALMERS



Undersökning av linjespänning vid återmatande bromssystem i spårvagn M31

Master of Science Thesis

KARL-MAGNUS OLSSON
FILIP PETTERSSON

Department of Energy and Environment
Division of electric power engineering
Masters program in Electric Power Engineering
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Göteborg, Sweden, 2007

Linjespänning vid återmatning

<blank sida>

Sammanfattning

Denna rapport är en studie av spänningsnivån i samband med återmatning av bromsenergi från spårvagnstypen M31 i Göteborg.

Vid bromsning så använder M31 elektrisk bromsning där motorerna får generera energi och om möjligt skicka tillbaka denna till kontaktledningsnätet, där andra vagnar i närheten kan använda denna återmatade energi för sin drivning. I de fall där ingen annan förbrukare finns på samma sektion så finns ett motstånd som har till uppgift att omvandla denna energi till värme. Regleringen av detta motstånd har dock visat sig ge upphov till en höjning av linjespänningen till alltför höga värden.

Undersökningar av spårvagnens reglerutrustning samt dess konstruktion har utförts. Vidare har mätningar på kontaktledningen genomförts för att kartlägga spänningsvariationer på den samma under en längre tidsperiod.

Det har visat sig att spänningen vid återmatning ofta befinner sig i intervallet 880-920V, extrema värden däröver har inte observerats i någon större omfattning. Spänningen är dock väldigt hög om man ser till nominella spänningen. Ett annat stort problem är den stora variationen på spänningen, där spänningen i ett pulserande förlopp varierar mellan 750V och 900V.

Nyckelord: Spårvagn, återmatande broms, tyristorstyrning, spänningsvariationer

Abstract

This report is a study in voltage level in connection with regeneration of brake energy from the tram type M31 in Gothenburg.

In the act of braking, the tram M31 uses electrical braking where the electrical motors generate energy and if possible send it back to the overheadline, where other trams in the nearby can use this regenerated energy for its own driving force. In cases where no other energy consumers are located in the same section, there is a resistance which task is to convert this energy into heat. The regulation of this resistance appears to cause an increase in the voltage level into far too high levels.

Investigations of the tram's regulation equipment and its construction have been done. Further have measurements on the overheadline been performed in order to map the voltage variations during a longer period of time.

The result has been showing that the voltage level during regeneration often is as high as 880V-920V, more extreme values have not been observed in a large scale. The values are especially high compared to the nominal voltage level. Another problem is the big variation in voltage, where the voltage pulsates between 750V and 900V.

Förord

Denna rapport är en del i examineringen av ett examensarbete på 20 poäng vid Chalmers teknisk högskola i Göteborg. Examensarbetet är i sin tur en obligatorisk del av Civilingenjörsutbildningen i elektroteknik med inriktning mot kraftelektronik. Examensarbetet utfördes på Göteborgs Spårvägar AB, avdelning Fordonsteknik, hösten och våren 2006-2007.

Vi vill tacka vår handledare Tommy Åkerblom och alla andra på Göteborgs Spårvägar som har varit oss behjälpliga med detta arbete. Också ett stort tack till folket på Vattenfall i Göteborg som hjälpt oss med mätningar i likriktarstationen. Dessutom vill vi tacka vår examinator Thorbjörn Thiringer, på institutionen för energi och miljöteknik, för för visat engagemang och snabba svar på frågor rörande rapporten

Innehållsförteckning

1 Introduktion.....	3
1.1 Problembeskrivning.....	3
1.2 Rapportlayout.....	4
2 Teknisk beskrivning.....	5
2.1 Spårvagn M31.....	5
2.1.1 Vagnbeskrivning.....	5
2.1.2 Bromssystem.....	6
2.1.3 Elsystem.....	6
2.1.4 LS-omriktare.....	8
2.1.5 Styrelektronik.....	9
2.1.6 Överspänningsomriktare.....	9
2.2 Övriga vagntyper i Göteborg.....	10
2.2.1 Spårvagn M32.....	10
2.2.2 Spårvagnar M28 & M29	10
2.2.3 Övriga vagnar.....	11
2.3 Trafikeringen.....	11
2.4 Linjenätet.....	12
2.4.1 Kontaktledning.....	13
2.4.2 Likriktare.....	14
3 Mätningar.....	15
3.1 Mätningar på styrkort.....	15
3.1.1 Signallista styrkort YYR 151.....	15
3.1.2 Metod och Instrument	16
3.1.3 Mätresultat.....	17
3.2 Mätningar på styrkort med pulskort.....	19
3.2.1 Resultat av mätning x.2.....	20
3.3 Verkstadskontroll.....	21
3.3.1 Utformnings av verkstadskontrollen.....	21
3.3.2 Test av verkstadskontroll.....	21
3.4 Mätning på bromsmotstånd.....	22
4 Fältmätningar.....	23
4.1 Mätningar i vagn.....	23
4.1.1 Energimätningar i vagn.....	24
4.1.2 Oscilloskopsmätningen.....	26
4.2 Kontaktledningsmätningar, egna samt utförda av Göteborg energi.....	30

4.2.1 Tidigare mätningar gjorda av Göteborg energi.....	30
4.2.2 Egna mätningar på Holtermansgatan.....	30
5 Slutsatser.....	34
5.1 Förekomsten av överspänningar.....	34
5.2 Orsaker till kontaktledningsspänning över 900V.....	34
5.3 Konsekvenser av höga spänningar.....	35
5.4 Konsekvenser av överspänningsregulatorns tröghet.....	36
6 Rekommendationer & förslag till fortsatt arbete.....	37
6.1 Övervakning av linjespänning.....	37
6.2 Modifiering av reglersystem och överspänningsomriktare.....	37
6.3 Uppdatering av verkstadskontroll.....	38
7 Källor och referenser.....	39
8 Bilagor.....	40
8.1 Avskrift av instruktion för verkstadskontroll.....	40
8.2 Utskrifter från linjemätningar av Göteborg Energi	41

1 Introduktion

Göteborgs spårvagnsnät trafikeras av en antal olika vagntyper där de två senaste modellerna återmatar energi till kontaktledningsnätet vid bromsning. Vid återmatning tillåts spänningen på linjenätet att öka till maximalt 900 volt, dvs 150 volt över normalspänningen 750 volt. Tidigare mätningar har dock visat att spänningen under återmatning, inte sällan, har stigit till närmare 950 volt under kortare perioder. Även korta toppar på runt 1000 volt har uppmätts.

Dessa höga spänningar orsakade av vagnarnas återmatning både stör tekniken i andra vagnar samt riskerar att öka slitaget på elektriska komponenter resulterande i höga underhållskostnader.

1.1 Problembeskrivning

Huvuduppgiften är att undersöka hur man kan förbättra återmatningen på spårvagnstypen M31.

Följande frågeställningar har formulerats av Fordonsteknik, Göteborgs spårvägar.

- Är regleringen av strömåtermatningen på vagntyp M31 tillräckligt noggrann för att klara de grundkrav vi ställer på den?
- Är det möjligt att få bort spänningstopparna över 900 volt?
- Är det enskilda vagnindivider som genererar spänningstopparna under återmatning?
- Kan vi skapa ett varningssystem för allt för hög återmatning?
- Ger verkstadskontrollen av återmatningen ett rättvisande resultat?
- Kan man genom bättre styrning av underhåll och kontroller i ärendet sänka kostnaderna?
- Kan man genomföra ombyggnader som sänker underhållskostnader eller ökar tillgängligheten på vagnarna?

Spårvägen har vid mätningar under felsökning av andra vagnar konstaterat att det förekommer höga spänningsnivåer på kontakledningen. I vissa fall har det bedömts att fel i andra vagnar har uppstått samtidigt som överspänningarna har detekterats.

1.2 Rapportlayout

Kapitel 2 är en teknisk beskrivning av spårvagn M31, Göteborgs spårvägsnät, och kort om andra vagnar som trafikerar spårvägsnätet. I kapitlet därefter behandlas mätningar på enskilda komponenter, bland annat överspänningsregulatorn, sedan följer ett kapitel som behandlar dels mätningar i rullande vagn samt långtidsmätning av kontaktledningsspänning.

Våra slutsatser av mätningar och studier av vagnkonstruktionen står i kapitel 5 och vidare finns ett kapitel med rekommendationer och förslag till fortsatt arbete.

2 Teknisk beskrivning

I detta kapitel finns dels en kort teknisk beskrivning av spårvagnstypen M31 samt viss bakgrund om övriga vagntyper, med bland annat pedelvagnar samt M32 samt spårvägsnätet i göteborg

2.1 Spårvagn M31

Informationen om M21/31 i följande stycke är i huvudsak hämtade från Fordonsbeskrivning M21 [1], Teknisk beskrivning M21, traktionsreglering [2] samt Beskrivning LS-omriktare [3].

2.1.1 Vagnbeskrivning

Konstruktionen av de mekaniska delarna, såsom korgen och dylikt gjordes av Hägglunds medan elektroniken konstruerades av ASEA. Spårvagn M21 som var den ursprungliga beteckningen, bestod av två vagnsdelar med en artikulationsled i mellan som gör det möjligt för de två vagnsdelarna att vrida sig i förhållande till varandra.

Man byggde senare om vagnen mekaniskt och tillförde en tredje vagnsdel, en så kallad låggolvsdel mellan de befintliga delarna. Löpboggien under artikulationleden byttes ut mot två stycken löpaxlar placerade under C-delen, låggolvsdelen. De två andra vagnsdelarna, den främre A-delen och den bakre B-delen, lämnades i stora drag orörda. Inga ändringar gjordes heller med drivsystem. Ombyggnationen medförde en viktökning av vagnen med 5500 kg och vikten idag är olastad 33000kg. Mellan 1998 och 2002 byggdes samtliga M21 vagnar om till M31, vilket blev det nya namnet. Ombyggnationen gjordes i tyskland av firma MGB som även byggt liknande delar till b.l.a. Tallinns spårvägar.

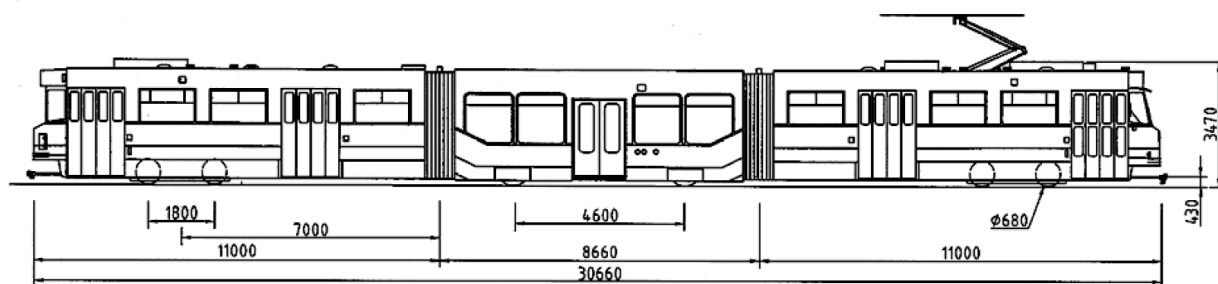


Fig.1 Spårvagn M31

Under A-delen och B-delen är de två motorboggierna placerade där vardera är försedd med två traktionsmotorer. Motorerna är separatmagnetiserade dc motorer med märkspänning 320 V och kontinuerlig effekt 75kW. I motorboggierna är båda motorernas rotorlindningar seriekopplade och styrs av en LS-omriktare baserad på

tyristorteknik. För att minska motorns varvtal till ett för hjulaxeln lämpligt, finns en växellåda placerad mellan motor och hjulaxel.

För energiförsörjning av kompressor, belysning, fläktar mm finns en hjälpkraftomriktare som ger 3 x 380 V, 50Hz och 24V dc

2.1.2 Bromssystem

Vagnens bromssystem består av en kombination av elektrisk broms och mekanisk broms. I första hand används den elektriska bromsen vilket gör att man kan återmata bromsenergin till kontaktledningsnätet istället för att den går till spillo. Andra fördelar med att använda den elektriska bromsen är att slitaget på den mekaniska bromsen minskar. Den elektriska bromsen bromsar endast på motorboggierna och vid behov kompletterar den mekaniska bromsen på C-delens löpaxlar.

Då det krävs högre bromskraft än vad den elektriska bromsen och den mekaniska bromsen på löpaxlarna kan ge, ansätts även mekanisk broms på motorboggierna. Elbromsen är aktiv ner till 5-10km/h och därefter vidtar mekanisk broms för att stanna vagnen samt hålla den stilla.

På varje boggie finns även två stycken skenbromsar placerade mellan hjulen. Skenbromsen består av en spole lindad runt en järnkärna och när dessa aktiveras går en ström genom spolen, och magnetflödet suger då fast bromsens undersida mot rälen vilket ger en bromskraft som inte beror på friktionen hjul-räl. Skenbromsen används vid panikbroms eller om hjulen slirar i nerförsbackar.

För att få elektrisk bromsverkan reverseras fältet i banmotorerna, dessa fungerar då som generatorer. Den energi som motorerna genererar kan antingen skickas tillbaka på kontaktledningsnätet om andra vagnar finns på samma sektion eller brännas bort som värme i bromsmotståndet.

Bromsmotståndet dimensionerades för vagn M21 att klara den effekt som motorerna kan generera vid maximal bromsning. När vagn M21 sedermera byggdes om till M31 och fick en högre vikt dimensionerades inte motståndet om, då det ansågs att det redan var så pass överdimensionerat och därmed kunde klara av den högre belastningen. Motståndet är placerat på A-delens tak och kyla av fartvinden.

2.1.3 Elsystem

Stor del av informationen i stycke 2.1.3 till 2.1.6 är tagen från Göteborgs spårvägar, Kretsschema M31 [4].

Från kontaktledningen tas strömmen ner via strömavtagaren som är placerad på A-delen. Från denna leds strömmen via linjebrytaren, vars uppgift är att kunna bryta eventuella felströmmar, till LS-omriktarna via en induktans som ett övertonsfilter.

Mellan linjeinduktorn och LS-omriktare finns en diod med en antiparallell tyristor, kallad den Ahlforska dioden. Diodens funktion är att förhindra urladdning av linjekondensatorerna vid en ev. yttre kortslutning. Tyristorn har till funktion att släppa ut återmatad energi på nätet och tänds då båda följande villkor är uppfyllda, bromsorder samt endera fram- eller back-order

Återledningen till jord efter motorerna sker via återledningsdon bestående av en kolborste anläggandes mot hjulaxeln, detta för att hålla strömmen borta från hjullager och växellådor.

För att ta hand om bromsenergin från vagnen, om det inte finns någon mottagare på samma kontaktledningssektion finns en överspänningsomriktare med tillhörande överspänningsmotstånd.

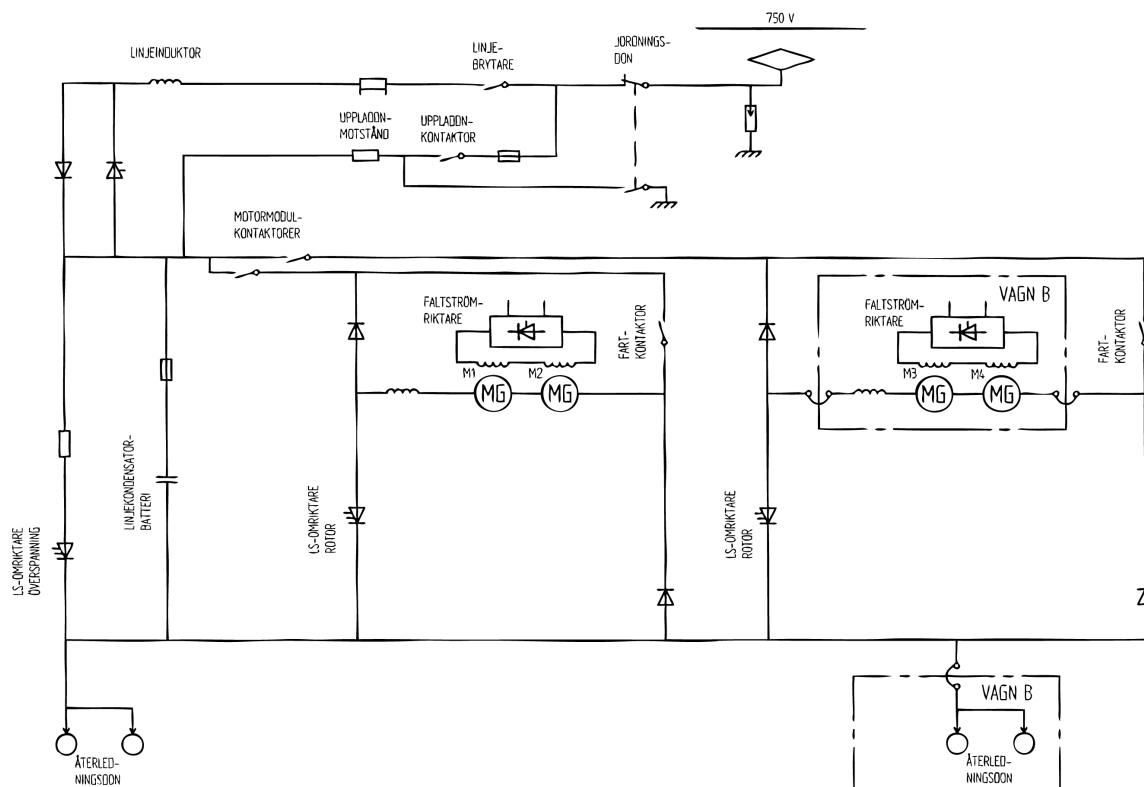


Fig.2 Huvudschema 700V, ABB Traction AB [2]

Hjälpkraft i form av 3-fas 380V kvasisinus samt 24V likspänning från från en omriktare på 25kW med en D/Y-0 transformator. Hjälpkraftomriktaren får sin matning parallellt med överspänningsomriktaren för att även strömmen till denna ska filtreras med linjeinduktor och linjekondensatorbatteriet.

Värmen i vagnen är ansluten direkt till 750V efter linjebrytaren, då elementen inte behöver övertonsfilter.

2.1.4 LS-omriktare

Att pulsbreddsmodulera likspänning med tyristorer är inte lika enkelt som med modernare halvledare då tyristorn kräver backspänning för att släckas. För omriktarna i M21/31 har man valt en lösning med en styrd LC-krets över huvudtyristorn som kan åstadkomma en negativ spänning vid ett givet tillfälle.

Funktionsbeskrivningen nedan bygger på principskissen i fig. 3.

Huvudtyristorn, Ty1, gör det nyttiga arbetet att styra motorströmmen, en släcktyristor, Ty3, som tillsammans med omladdningstyristorn, Ty2, har till uppgift att släcka huvudtyristorn. Vidare finns även en frihjulsdiod, D_B , för att leda strömmen genom ankaret (A) då tyristorerna är släckta.

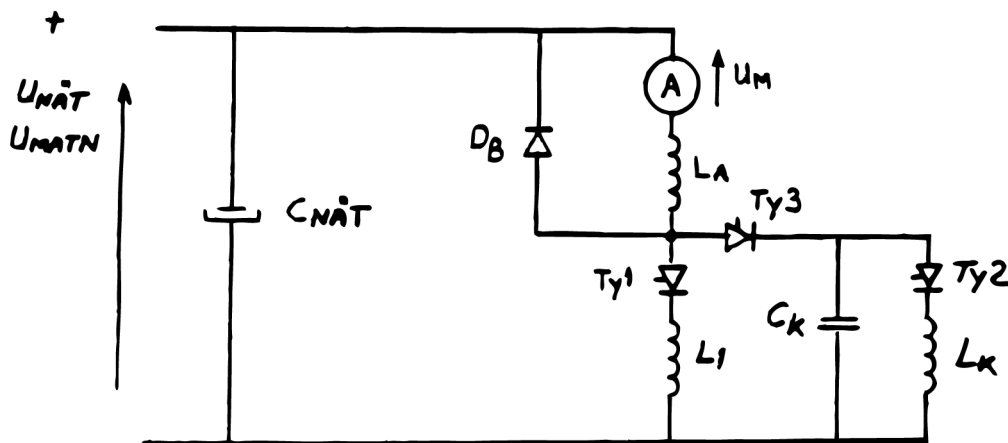


Fig.3 Principskiss LS-omriktare, ABB Traction AB [3]

Arbetsprincipen är att Ty3 tänds först och laddar upp C_k till nästan U_{nat} . Ett par μs efter Ty3 ges tändpuls till Ty1. När Ty1 är tänd backspänns Ty3 som då släcks. Ytterligare $20\mu s$ senare tänds Ty2 och en LC-svängningskrets av L_k & C_k bildas. Denna svängningskrets "laddar om" C_k till negativ spänning om ca 0.9 ggr U_{Ck} .

Släckning av huvudtyristorn Ty1 sker genom att återigen tända Ty3. C_k är då laddad till negativ spänning vilket backspänner Ty1 som därigenom släcks. Under släckningen av Ty1 laddas C_k återigen till positiv spänning, men denna gång blir spänningen något högre än U_{nat} på grund av induktansen L_A samt viss induktans i kablage. Denna spänning leder till att Ty3 backspänns och därigenom är tyristorgruppen klar för ny tändning av huvudtyristorn.

Noterbart är att under en kort tid är spänningen över lasten $1,9$ ggr U_{nat} .

2.1.5 Styrelektronik

Vagnen styrs primärt av en rackmonterad styrdator som bygger på en Motorola M68000. Denna kommunicerar via ett antal I/O-kort med vagnens övriga delar och via ett korthållsmodem med eventuella tillkopplade M31-vagnar.

Datorn sköter bland annat beräkningar av hur stor utstyrningen vagnen tillåter föraren att göra med hänsyn till linjespänning, hastighet, ledvinkel, vikt mfl faktorer. Dessa värden är inte lika för retardation resp acceleration, utan generellt tillåter datorn av förståliga skäl högre strömmar vid retardationer

För att inte belasta styrdatorn med beräkningarna kring tyristordriften skickar denna information om utstyrning och andra parametrar till två modulator-datorer. Dessa båda får sedan hålla reda på tändsekvens och tider för de båda motoromriktarna utifrån mätvärden av ström och spänning i motorena.

Hjälpkraftomriktaren styrs helt med diskret logik på separata kort.

2.1.6 Överspänningsomriktare

För att styra hur mycket energi som bromsmotståndet ska bränna finns en överspänningsomriktare placerade i serie med ett bromsmotstånd. Denna bygger på en tyristorkoppling liknande den i LS-omriktarna med tillägget att ösp.omriktaren har dubbla huvudtyristorer p.g.a dess högre effekt.

Arbetsprincipen skiljer sig från LS-omriktarna, då ösp. har en fast pulsbredd och varierar tiden mellan pulserna

Till omriktaren hör en separat PI/P- reglering som mäter kontaktledningsspänningen och jämför denna mot ett tröskelvärde, vilket är olika om vagnen är i broms eller driv. P-delen av regulatorn är lite snabbare men har ett tröskelvärde som är 20-30V högre än motsvarande för PI-regulatorn.

Vidare finns två separata skydd, dels momentantändning som tänder vid 950V vars funktion är att skydda vagnen utifall att PI/P-regulatorn inte triggar på en nivå eller att spänningen stiger väldigt snabbt, dels finns katastroftändning som träder i kraft vid 1050V som också slår ur linjebrytaren. Katastroftändningen är en direkt tändning av huvudtyristorerna och det finns ingen möjlighet att släcka dessa förens spänningen är noll.

I överspänningsregleringen finns även en övervakning av vagnens linjeström minus motorströmmarna, som har till syfte att bryta linjebrytaren om differensen är för stor under en viss tid. Detta för att bryta en eventuell felström i överspänningsomriktaren.

Styrningen till ösp.omriktaren är fysiskt lokaliserad till tre rackmonterade kort, ett styrkort YYR151 [5] med regulatorerna och dess kringssystem, ett styripulskort YYX 140 [6] som sköter pulsbreddsmoduleringen och tidsstyrning av pulser till de olika

tyristorerna samt ett styripulsförstärkarkort YYU 128 [7], vars uppgift är att förstärka pulserna från styripulskort samt modulera dessa med 100kHz. Moduleringen är för att minska effektbehovet i pulserna, så en kontinuerlig tändpuls hade krävt mycket energi.

2.2 Övriga vagntyper i Göteborg

Förutom M31 finns två typer ytterligare i normal trafik, nyförvärvet M32, en modern låggolvsvagn som ännu är under leverans samt "pedalvagnar" som egentligen är två typer, M28 resp M29.

2.2.1 Spårvagn M32

En nykonstruerad låggolvs vagn som håller på att införas i Göteborg. Den har 4st asynkronmotorer som matas med 3-fas 400V från dc/ac-omriktare (med IGBT-transistorer) Hjälpkraft i form av 3-fas 400V ac och 24V dc finns till bland annat belysning, ventilation, luftkonditionering mm..

Vagnen saknar boggier och egentliga hjulaxlar utan har istället truck-ramar med separat lagrade hjul. Vardera traktionsmotorerna driver två hjul på en "axel" via två växellådor och en drivaxel.

Återmatning finns på dessa vagnar men regleringen har visat sig vara väldigt god och höjningen av linjespänningen är endast marginell.

2.2.2 Spårvagnar M28 & M29

Kallas pedalvagnar på grund av manövreringen med pedaler istället för en handkontroll. De är höggolvsvagnar av 60-tals konstruktion som fortfarande gör mycket tjänst i trafiken. M28 beräknas tas ur trafik inom ett par år, då M32 levererats i erforderligt antal. Någon plan för ersättning av M29 finns inte i nuläget.

Motorstyrning sker med kontaktorer & motstånd från ett reläbaserat styrsystem. Detta "kopplar upp" motorerna med ett minskat antal resistorer och serie-parallellkopplingar efter förarens börvärde på acceleration.

Dessa vagnar innehöll ursprungligen väldigt lite elektronik, men lågspänning (24V dc) för belysning, kontaktorstyrning, biljettmaskiner etc erhålls från en roterande omformare i M28. Omformarens motor användes även för kupéventilationsfläkar placerade på omformarens axel.

I och med en ökad förbrukning med nya biljettsystem, radio, PLC-styrningar etc. har M29 istället för sin roterande omformare fått en statisk omriktare för 24V samt en omriktare för två 3fas 400V fläktar. M29 har även en kompressor med en 750V motor för tryckluft till bromsar och dörrar.

2.2.3 Övriga vagnar

GS Banteknik har en arbetsvagn, 143, som trafikerar spårvägsnätet, denna vagn mäter kontaktledningens placering samt med ett för ändamålet avsett släp även fysiska hinder i spårets närområde.

Vagn 143 är en ombyggd Høka-vagn från Oslo, den har en omriktare för motordriften samt statisk omriktare till lågspänning & 230V.

Vidare finns ett tiotal museievagnar, de flesta har motståndsreglering av motorströmmen, men ett flertal har helt manuell uppkoppling med en vals med kontaktstycken. En vagn finns i nuläget med tyristoromriktare för motordriften, denna vagn har möjlighet till återmatning vid broms men enligt mätningar vid flertalet provkörningar har denna vagn inte lämnat höga nivåer på återmatad spänning.

Stundtals kan även gästvagnar förekomma på Göteborgs spår, bland annat har en duo-spårvagn gästat sommaren 2006. Duo betyder i det här fallet att vagnen antingen kan drivas med 750V dc eller t.ex. 15kV 16 2/3Hz ac. Vitsen med det är att vagnen då även kan trafikera järnväg. Istället för elutrustning för ac-nät kan de även ha en dieselmotor som alternativ energikälla.

2.3 Trafikeringen

Spårvägen har i dagsläget som mål att M31 ska ta huvuddelen av den trafik som körs, dels på grund av kapaciteten och dels för att den har låggolv vilket efterfrågas av resenärerna. Trafiken med pedalvagnar försöker man hålla så låg som möjligt och trafiken med M32 är ännu ganska låg men kommer så småningom att komplettera M31, förutom under nätterna.

En M31 gör i genomsnitt 100 000 km på de ca 340 dagar per år som de rullar.

2.4 Linjenätet

Göteborgs spårvägsnät består av ca 80 km dubbelspår,

Eftersom staden är kuperad så följer spåren densamma, från havsnivå till ca 100m över havet. Detta medför en hel del backar, som trafikeras i båda riktningar.

I stadsmiljö går spårvägen i gatuspår som delas med andra fordonslag alternativt på egen banvall där endast spårvagnar kör. Utanför den centrala delarna är egen banvall dominerande, på dessa finns dock en del vägkorsningar.

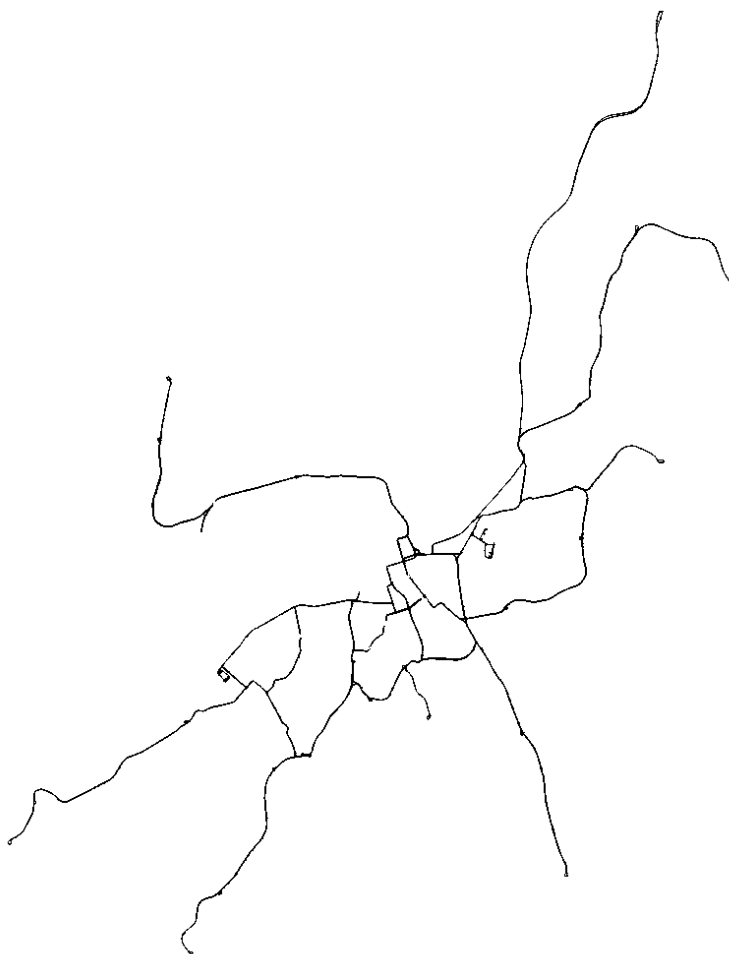


Fig.4 Schematisk linjekarta, Göteborgs spårvägar (Banteknik).

Linjenätet har planerats så att det följer befolkningen och deras huvudsakliga transportvägar. Detta ger att det både finns stadsmiljö, där avstånden mellan hållplatserna är korta och medelhastigheten är relativt låg, samt karaktär av förortsbana med långa hållplatsavstånd och stundtals långa körsträckor där hastigheten kan hållas uppe.

2.4.1 Kontaktledning

Kontaktledningen är uppdelad i 81 sektioner, i allmänhet ligger båda spåren på samma sektion men undantag finns. Sektionerna separeras med isolerskarvar , ca en meter långa, illustreras i fig. I en hel del fall finns frånskiljare kopplade över dessa isolerskarvar för att möjliggöra matning mellan sektioner.



Fig.5 Isolerskarv på kontaktledning.

Sektionernas matas i innerstaden och på hårt trafikerade sträckor från två håll och sektionerna hålls i allmänhet ganska korta för att dela lasten samt ge en bättre redundans vid eventuella haverier.

Utanför innerstaden är sektionerna längre, och varje likriktarstation matar ofta flera sektioner där endast vissa har dubbla matningspunkter.

2.4.2 Likriktare

Längs spårvägsnätet finns 60 st likriktarstationer där varje station innehåller en eller flera likriktare (Fig 6), transformatorer, ett växelströmsställverk samt ett ställverk för likspänningen.



Fig.6 Öppet likriktarskåp i likriktarstation

Likspänningsställverket kan bestå av antingen enbart en brytare mot linjen alternativt ett med komplett ställverk med flera brytare, skenor, sammankopplingsmöjligheter etc. Likriktarstationerna matar sedan till matningspunkterna ute vid kontakledningen och deras lokala franskiljare.

Det finns ingen övervakning på DC-sidan, förutom brytarutlösningar. Dock finns larm för bortfall av likriktare, spänningslöst på AC-sidan, överhettningar mm.

3 Mätningar

Som inledande mätningar valdes att gå igenom och funktionskontrollera den utrustning som fanns och ansågs relevanta med avseende på överspänningsregleringen. Mätningar på reglerutrustningens styrkort och styripulskort har utförts i labbmiljö, dvs utanför vagnen. Den verkstadskontroll som är tänkt att årligen utföras på spårvagnarna, för kontroll av överspänningsomriktaren, har studerats för att finna eventuella brister och för att kunna ge förslag på förbättringar.

3.1 Mätningar på styrkort

Ett antagande som gjordes var att överspänningar vid återmatningen var ett resultat av att reglerutrustningen var felinställd eller hade brister. Mätningar på styrkortet YYR 151 gjordes för att kontrollera kortets funktion och för att kunna mäta upp värden på spänningsregleringens tröskelnivåer. Även responstider för signalerna "Deblockering överspänningsomriktare" och "Momentantändning" mättes. Styrkortet kopplades i en senare mätning ihop med styripulskortet YYX 140, här kallad mätning nummer 2. Med korten i den uppställningen mättes nivåer för minsta respektive största utstyrningsgrad för huvudtyristorn. För att få en uppfattning om eventuell avvikelse i nivåerna på olika styrkort gjordes mätningar på fem olika kort från olika vagnar. Mätning nummer 2, med de båda korten gjordes enbart med en uppsättning kort.

3.1.1 Signallista styrkort YYR 151

Tabell 1 Insignaler till styrkort YYR 151

Signal	Beskrivning	skalfaktor
UN+	Linjespänning	100V / V
IN+	Linjeström	100 A / V
I1	Motorström motorgrupp 1	100A / V
I2	Motorström motorgrupp 2	100A / V
DEBLOVCH	Tvångsutstyrning av överspänningsomriktare på minsta ledtid	[Digital]
Nivå_CH	Anger om vagnen är i läge "broms" eller "driv"	[Digital]
+24VD	Matningsspänning 24V	[Digital]

Tabell 2 Utsignaler från styrkort YYR 151

Signal	Beskrivning	skalfaktor
Debl.USÖ	Deblockera överspänningsomriktare	[Digital]
-USÖ	Analog styrspänning till överspänningsomriktare	1 - -10V
MT-N	momentantändning av överspänningsomriktare	[Digital]
KP-N	katastroftändning av överspänningsomriktare	[Digital]
KM	Katastrofåtgärd (utlösning av linjebrytare)	[Digital]

3.1.2 Metod och Instrument

Eftersom det visade sig ganska svårt att simulera alla insignaler på ett exakt sätt och ha koll på utsignalerna, tillverkades en enkel testtrigg där signalerna till styrkortet kan ställas in och där vissa av utsignalerna övervakas. Via potentiometrar simuleras de analoga insignalerna: kontaktledningsspänningen UN+, strömmen IN+, samt motorströmmarna I1 och I2. Inställningen av motorströmmarna behövde inte göras med alltför god precision, därför användes envarviga potentiometrar för dessa signaler. Spänningen UN+ behövde däremot kunna ställas in mer exakt, för den användes en flervarvig potentiometer för ökad precision. De digitala signalerna DEBLOVCH samt NIVÅ_CH manövrerades med varsin switch.

Kortets spänningsmatning, +15 V, samt +24VD, matas från ett spänningsaggregat.

Utsignalerna Debl.USÖ, MT-N, KP-N samt KM, alla digitala signaler kopplades till var sin lysdiod för att lätt kunna övervakas. Den analoga signalen -USÖ kopplades till ett digitalt oscilloskop. På styrkortet finns förutom utsignalerna ett antal mätpunkter. För att kunna se hur de olika reglerdelarna, PI- delen och P-delen arbetar, utfördes mätningar på mätpunkterna 1 och 2 enligt Blockschema YYR 151, fig 7. Dessa signaler kopplades även de till ett digitalt oscilloskop.

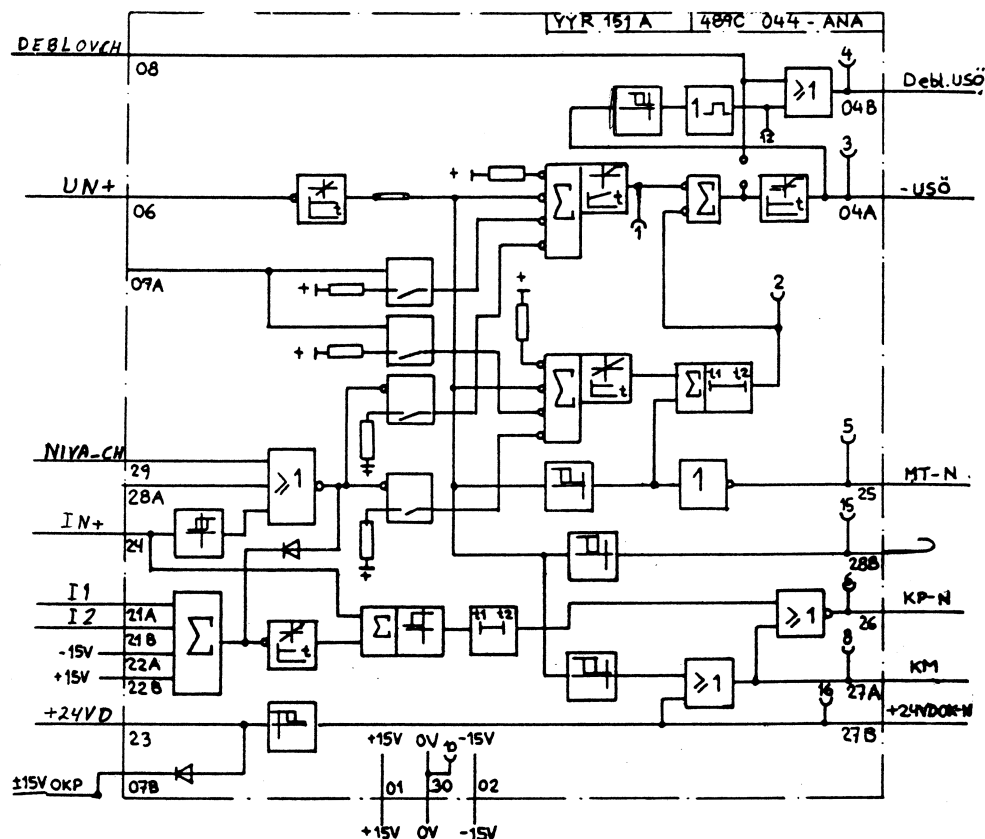


Fig.7 Blockschema styrkort YYR151, ASEA Automation [4].

Eftersom linjebrytaren, signal KM, löser ut då strömmen IN+ är större än värdet på I1+I2 ställs dessa signaler in så att inte detta inträffar. DEBLOVCH sätts i läge av.

Under mätningarnas gång kommer NIVÅ-CH att ändras för att notera skillnaden mellan de olika tröskelnivåerna för bromsläge och drifläge. Spänningen UN+ ökas med hjälp av potentiometern och aktiveringsnivåerna för Debl.USÖ, MT-N respektive KP-N noteras i tabell 1 för bromsläge och i tabell 2 för drifläge. Även värden för när regulatorerna PI och P aktiveras för in i samma tabell.

Responstiderna för signalerna Debl.USÖ och MT-N mättes genom att lägga ett spänningssteg på insignalen UN+. Insignalens amplitud varierades enligt tabell 3 och 4. Stegets stigtid kan anses vara försumbar i förhållande till de responstider som uppmättes. Även dessa mätningar gjordes med ett digitalt oscilloskope. I oscilloskopet kunde både insignal i form av stegfunktion och utsignaler iaktas. Tidsskillnaden uppmättes och noterades i tabell 3 och 4

3.1.3 Mätresultat

Vid jämförelse med specificerade värden visade det sig att det i dokumentationen fanns flera olika värden, tabell 3. Vilka som är de idag gällande är oklart men de senast daterade (1988 vecka 49) är hittade i kortbeskrivning YYR151. Eftersom många av de uppmätta värden skiljer sig från de i specifikationen kan det antas att korten har

ändrats senare, men detta har inte dokumenterats. Det kontrollerades även med Jan Rasmussen på GS elektronikverkstad om det förekommit några modifikationer på korten. Enligt honom hade inga förändringar skett.

De fem kort som slumpvis valts för mätning visade sig ligga väldigt lika i nivå. Skillnaden mot de specificerade värden var betydligt större, då de enda värden som överensstämmer med specifikationen är Debl.USÖ (broms) samt MT-N som stämmer med värdet från beskrivning LS-omriktare, DTC 88501-ALL. Varför det är så stora differenser är svårt att säga men förmodligen är inte dokumentationen tillräckligt uppdaterad.

Förutom differensen mot specificerade värden fungerar korten som det är tänkt. Misstankar om att det skulle finnas variationer mellan korten verkade obefogad. Då antalet testade kort inte är så stort kan det givetvis finnas kort som skiljer sig, men det ger ändå en indikation på att korten håller sig inom det tänkta värdet.

Tabell 3 Mätning av spänningsnivåer på kort YYR 151. Broms. [Volt]

	Kort1 [V]	Kort 2 [V]	Kort 3 [V]	Kort 4 [V]	Kort 5 [V]
Debl.USÖ	8,65	8,66	8,65	8,66	8,68
MT-N	9,35	9,42	9,40	9,45	9,35
KP-N	11,60	11,60	11,67	11,66	11,55
PI	8,65	8,66	8,63	8,63	8,67
P	8,86	8,89	8,84	8,83	8,94

Tabell 4 Mätning av spänningsnivåer på kort YYR 151. Ej broms.[Volt]

	Kort1 [V]	Kort 2 [V]	Kort 3 [V]	Kort 4 [V]	Kort 5 [V]
Debl.USÖ	8,90	8,92	8,91	8,89	8,93
MT-N	9,35	9,42	9,40	9,45	9,35
KP-N	11,58	11,60	11,67	11,66	11,55
PI	8,90	8,86	8,87	8,87	8,97
P	9,09	9,12	9,07	9,07	9,18

Tabell 5 Uppmätta värden jämförda med specifikationen.[Volt]

Signal	Uppmätt (medel)	Enl. kort-beskrivning YYR151A	Enl. beskrivning LS-omriktare
Debl.USÖ (Broms)	867	870	870
Debl.USÖ (Driv)	891	950	917
MT-N	939	980	939
KP-N	1161	1050	1100

När det gäller responstiderna uppmätta på styrkortet kan det konstateras att vid spänningar runt 900V är reglersystemet relativt långsamt, då det vid 900V tar 254 ms innan signal till överspänningsomriktarens tyristor ges, tabell 4. Vid spänningar runt 950V är systemet betydligt snabbare, då det vid 953V tar 300 μ s. De höga responstider uppmätta vid 900V kan vara orsaken till de spänningsspikar som noteras i början av ett bromsförlopp, då regleringen helt enkelt inte hinner med. Responstiderna för momentantändningen, tabell 5, är mycket snabba och detta beror på den höga spänning (940V) som krävs för att tändning skall ske.

Tabell 6 Responstider för trigging av styrsignal (Debl.USÖ).

Amplitud [V]	Tid
900	254 ms
912	52 ms
931	560 μ s
953	300 μ s

Tabell 7 Responstider för trigging av Momentantändning (MT-N).

Amplitud [V]	Tid
956	226 μ s
971	141 μ s
993	28 μ s

3.2 Mätningar på styrkort med pulskort

I denna mätning används styrkort YYR 151A, fig 8, och styripulskort YYX 140 tillsammans. Nu kopplas istället utgångarna från styrkortet till styripulskortets ingångar. Insignalerna till styrkortet är de samma som i mätuppställning 1.

Spänningsmatningen, +15V till styrkortet, anslöts till samma spänningsaggregat som styrkortet.

Synkroniseringspulser till överspanningsomriktarens tändning kopplas in på ingångarna 21 och 22 på styrkortet i form av en 520Hz fyrkantsvåg med amplituden 15V. Till utgång 04 på kortet YYX 140 (styrsignal till huvudtyristorn) kopplades ett digitaloscilloskop där avläsning skedde. Sedan varierades spänningen UN+ för att påvisa de olika utsyrningsgraderna. De övriga utgångarna på kortet (05 och 07) är styrsignaler till omladdningstyristorn respektive släcktyristorn.

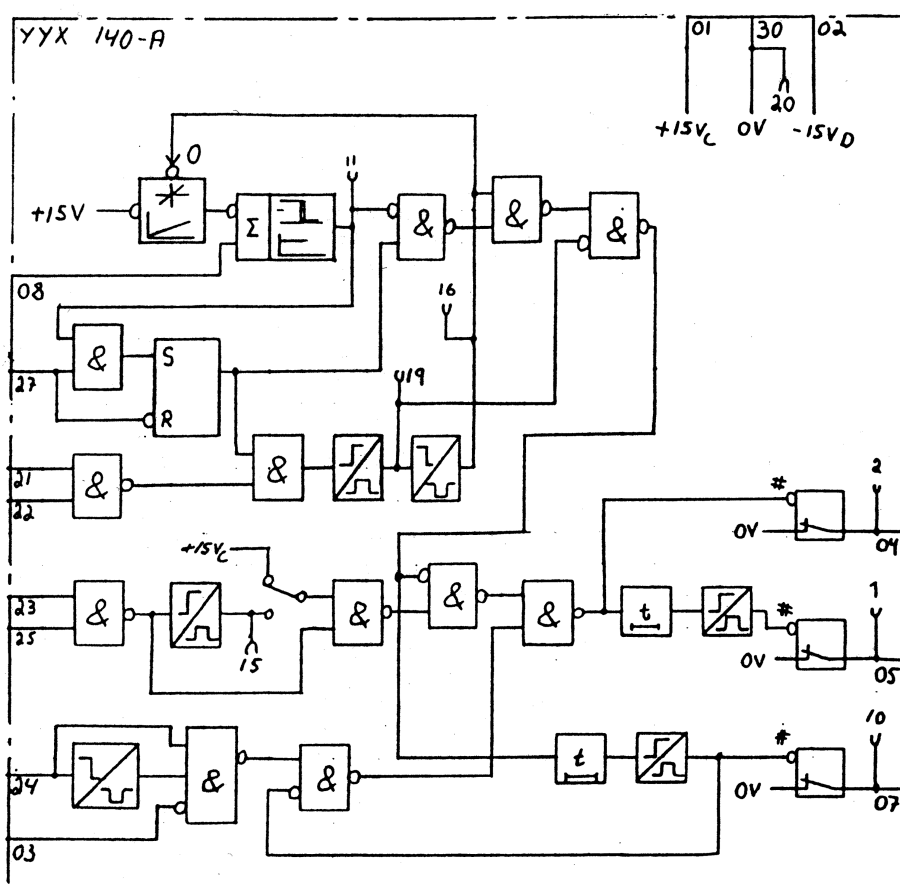


Fig.8 Blockschema styripulskort YYX 140, ASEA[5].

3.2.1 Resultat av mätning x.2

Utsyrningsgraden visade sig variera från 13% då Debl.USÖ precis aktiverats till 87% precis innan momentantändning sker. Momentantändning innebär att utstyrningsgraden är 100%.

3.3 Verkstadskontroll

För att kontrollera om vagnens överspänningsomriktare och vagnens bromsmotstånd håller sig inom tänkta värden gör man årligen ett test, så kallad verkstadskontroll. kontrollen utförs av elektriskt kunnig reperatör i verkstaden och värdena skall i en pärm. Vid konstaterat fel utförs lämplig åtgärd. I samband med kontrollen görs även en visuell bedömning av bromsmotståndens skick, då den kraftiga värmeutvecklingen medfört att många motstånd har blivit krökta.

3.3.1 Utformnings av verkstadskontrollen

Testet är utformat enligt följande princip. Man kopplar ur signalen för linjespänning och ersätter den med en variabel spänning via en potentiometer som matas från +15V. På detta sätt kan man enkelt simulera linjespänningen med hjälp av potentiometern. En voltmeter kopplas över den simulerade spänningen för att man enkelt skall kunna se vid vilken spänning systemet arbetar. En annan voltmeter kopplas över bromsmotståndet. Sedan ökas spänningen med hjälp av potentiometern tills det att överspänningsomriktaren startar.

När överspänningsomriktaren är fullt öppen skall spänningen över motståndet vara mellan 500–600V. Efter 1 sekund kommer linjebrytaren att lösa ut p.g.a. differens mellan motorström och linjeström.

Genom att mäta spänningen över bromsmotståndet får man information om överspänningsomriktarens utstyrningsgrad. Till exempel en lägre uppmätt spänning än den angivna 500-600V kan innebära att utstyrningsgraden är för låg. Tidigare mätningar på styrkortet YYR 151A och styripulskortet YYX 140C har visat att den maximala utstyrningsgraden ligger på ca 87%.

Se appendix 1 för instruktionen i sin helhet

3.3.2 Test av verkstadskontroll

Ingångsvärden: systemläge broms.

För att få en uppfattning om hur verkstadskontrollen går till och för att kunna testa dess tillförlitlighet och utformning i verkligheten utförde vi en egen kontroll. Testutrustningen kopplades upp och genomfördes enligt anvisning.

Enligt anvisningarna skulle potentiometern vridas upp till 9,5V $\pm$ 0,1V och där skulle överspänningsomriktaren starta. Redan här kunde vi konstatera att detta värde är på tok för högt, enligt funktionsbeskrivningen ska överspänningsomriktaren börja arbeta redan vid 870V då bromsreferensen är vald. Tidigare mätningar på 151-kort har verifierat att denna nivå gäller.

Vid testets genomförande var vi därför beredda på att ett tidigare startförlopp. Det visade sig vara korrekt, överspänningsomriktaren startade vid ca 8,9V. Efter att ha vridit upp potentiometern ytterligare kunde spänningen över bromsmotståndet avläsas till ca 550V, alltså helt inom angivna gränser.

Under verkstadskontrollens genomförande konstaterades att uppkopplingen av testmetoden var enkel men att själva genomförandet inte ger de resultat som man önskade kontrollera. Testet saknar en tydlig beskrivning av syfte, vilka värden det är man letar efter, och anvisningarna är inte heller korrekta.

3.4 Mätning på bromsmotstånd

Enligt teknisk beskrivning skall bromsmotståndets resistans vara 0,76 Ohm. Vi beslöt oss för att göra ett antal stickprovsmätningar. Motståndet uppmättes i kallt tillstånd, med milliohm-meter och kelvinklämmor direkt på kabelanslutningarna. Kablaget till tyristorer och jord fränkopplades ej, då resistansen genom omriktaren ej bedömdes störa mätningen nämnvärt. Mätningarna visade på värden mellan 0,76 - 0,78 Ohm, alltså väldigt nära det angivna värdet. Vidare undersökningar och mätningar av bromsmotståndet ansågs inte nödvändiga.

Tabell 8 Mätning på bromsmotstånd

Mätning nr - (vagn nr)	Värde [$\text{m}\Omega$]
1 (304)	760
2 (340)	780
3 (375)	780

4 Fältmätningar

4.1 Mätningar i vagn

I denna mätning har vi dels för översikt loggat mätvärden under körning till en dator med hjälp av en LabJack-9, en 12 bitars A/D omvandlare med USB gränssnitt, samt LabView. Under körningarna har systemet samplat, med ca 6Hz, följande variabler: Kontaktledningsspänning, kontaktledningsström, motorströmar (2st), motorspänningar (2st) samt fältströmmarna (2st).

Vidare har ett snabbare mätsystem, ett minnes oscilloskop HIOKI 8840, använts för att få en detaljerad mätning på hur kontaktledningsspänningen varierar samt hur t.ex. styrsignalen till överspänningsomriktaren arbetar vid bromsning.

Mätvärden på motor och kontaktledningsströmmar finns tillgängliga direkt i vagnen via en "mätlåda". Lådan är tillverkad av ASEA till spårvagn M21/31 och har en instrumentpanel samt anslutningar för externa mätinstrument.

Körningarna skedde med en övningsvagn, utan last och med förareelever, så man kan anta att en vagn i trafik har högre energiflöden. Att utföra dessa mätningar på en vagn i trafik hade varit att föredra men på grund av utrustningens storlek och dess inkoppling är detta alltför komplicerat. Den färdväg som kördes var varierad och innefattade bland annat Hisingen och en del innerstadskörning. På vår önskan gjordes även körningar genom Chalmerstunneln vid ett antal tillfällen då denna har en lång utförlöpa samt är en egen kontaktledningssektion. De sträckningar som är intressanta att titta på ur överspänningssynpunkt är de med bromsning i nedförsbacke, ju brantare ju bättre, och gärna i ytterområden med ett fåtal vagnar per linjesektion.

Värt att notera är att i innerstaden så sker nästan ingen överspänningsreglering. Det finns oftast tillräckligt med vagnar på samma sektion som kan dra nytta av energin. Även den låga hastigheten bidrar, vid svaga bromsningar använder vagnen själv bromsenergin till hjälpkraftsystemen.

4.1.1 Energimätningar i vagn.

Utifrån datormätningen beräknades ungefärliga värden på energiflödet i vagnen, tabell 7. Det inkluderar dragen resp. återmatad energi till kontaktledningen, driv- resp bromsenergi i motorerna, en approximation på bränd effekt i överspännings motståndet, och ett ungefärligt värde på hur mycket energi som behövs till hjälpsystemen. Det finns även ett mått, återmatningsgraden, på hur stor andel av den bromsenergi som motorerna producerat som har skickats ut på kontakledningen igen. Resterande del av energin, dvs den som inte skickats ut delas upp i en mindre del till vagnens egna hjälpkraft och det mesta blir värme i bromsmotståndet.

Tabell 9 Energimätningar i vagn. (kWh om annat ej anges)

	29/11 fm	29/11 em	30/11	5/12
Körtid	1h40m	2h35m	3h20m	1h
W dragen	63,5	83,8	154,5	60
W återmatad	8	12	25,5	9
Summa energi	55,5	72	129	51
W motor driv	44	54	128	45,7
W motor broms	23	27	60,5	20,4
Summa motorenergi	21	27	67	25,4
W ösp.motstånd	15	15,2	35	11,4
W hjälpkraft	19,5	30	26,8	14
Återmatningsgrad	35%	43,5%	58%	44%

På grund hur vagnens mätpunkter är placerade så finns vissa approximationer i ovanstående, t.ex. så innehåller "W ösp.motstånd" även vagnens hjälpkraft under perioder då överspänningsomriktaren går, 5-10% av denna energi kan antas vara hjälpkraft. Vidare innehåller "W hjälpkraft" förluster i LS-omriktare, då denna energi är beräknad genom linjeeffekt minus motoreffekt i varje givet tillfälle. Kupevärmens är däremot inte med i denna beräkning.

Återmatningsgraden är ungefär 35-60% beroende vilka linjer vagnen går, antalet passagerare och förarens körsätt. Under mätturen konstaterades att den i innerstaden är hög, nästan 100% men på grund av låga hastigheter så är bromseffekten sällan hög och således blir den återmatad energin inte stor. I ytterområdena däremot, där trafiken är glesare, är återmatningsgraden låg, endast stundtals finns en annan vagn som kan ta emot energi. Här förkommer även en del av fenomenet att vagnar bromsar åt varandra,

då en vagn bromsar så börjar överspänningsomriktaren på en stillastående eller rullande vagn på samma sträcka att arbeta då denna vagn kan ha ett något lägre tröskelvärde än den bromsande.

Vidare kan man se att energiåtgången varierar från ca 33kWh/timme under 29/11 fm till 51kWh/timme den 5/12. Denna skillnad beror precis som ovan på linje, lasten & förarens körsätt.

Även om en vagn finns på samma sektion och kan ta emot energi så är det inte säkert att den kan ta emot all bromsenergi, utan överspänningsmotståndet får gå in och ta en del. Vid dessa tillfällen ligger linjespänningen på runt 880V, eftersom det är då överspänningsregulatorn sätter in. I fig 9 kan man se dels hur överspänningsomriktaren (kurvan längst ner) får ta en stor del av energin, mellan 76 till 77 minuter samt hur återmatningen (negativ kurva i mitten) tar den största delen, vid 80 min. Notera att den bromsande vagnens hjälpkraft samt förluster i LS-omriktare mm. åskådliggörs som brändeffekt, så cirka 15-30 kW av den visade effekten är inte bränd.

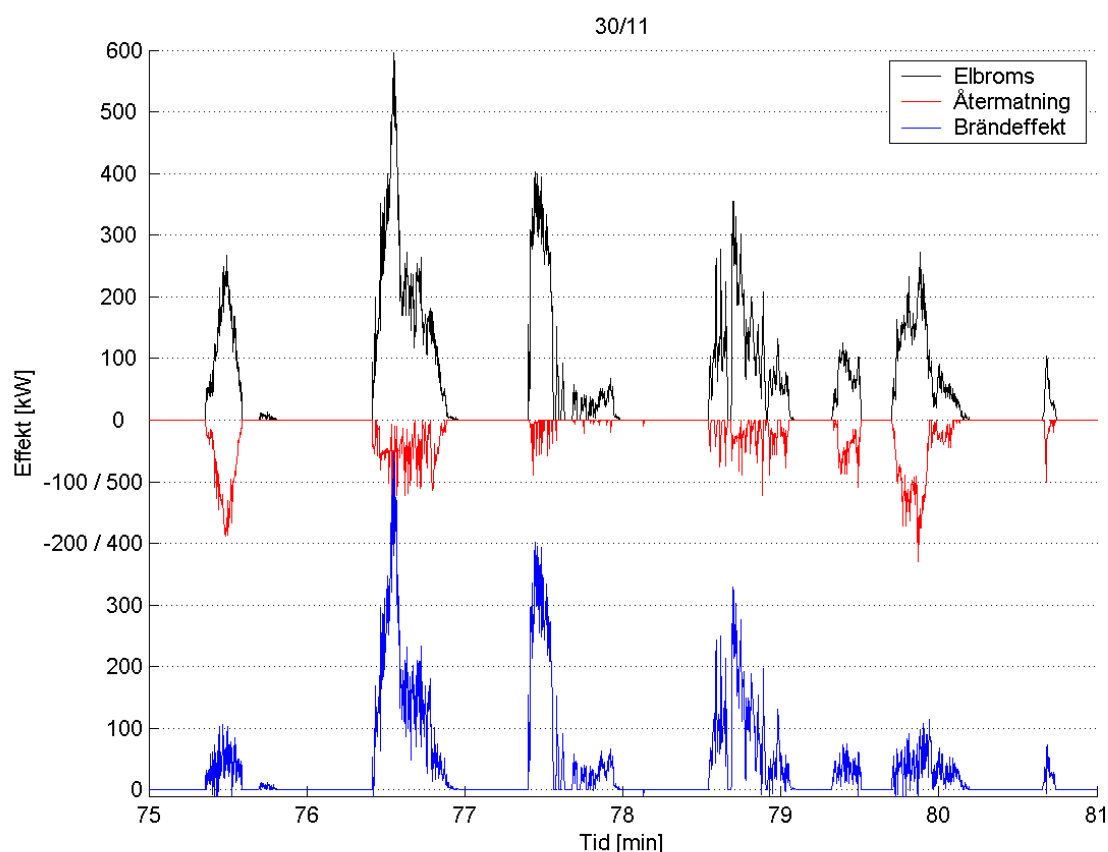


Fig.9 Fördelning av återmatning och "brändeffekt" mot elbromseffekt.

I figur 10 visas linjespänningen samt linjeströmen vid samma tid som fig 9 och man kan se hur linjespänningen är hög, strax under 900V vid ett par tillfällen mellan 76-77 min. Vid 80 min kan man i fig 10 se hur en annan vagn tar upp bromsenergin som visas i fig

9 då linjespänningen inte höjs förens i slutet. Denna puls beror troligen på att den mottagande vagnen försvann in på nästa sektion alternativt sluta driva och drog därmed mindre ström.

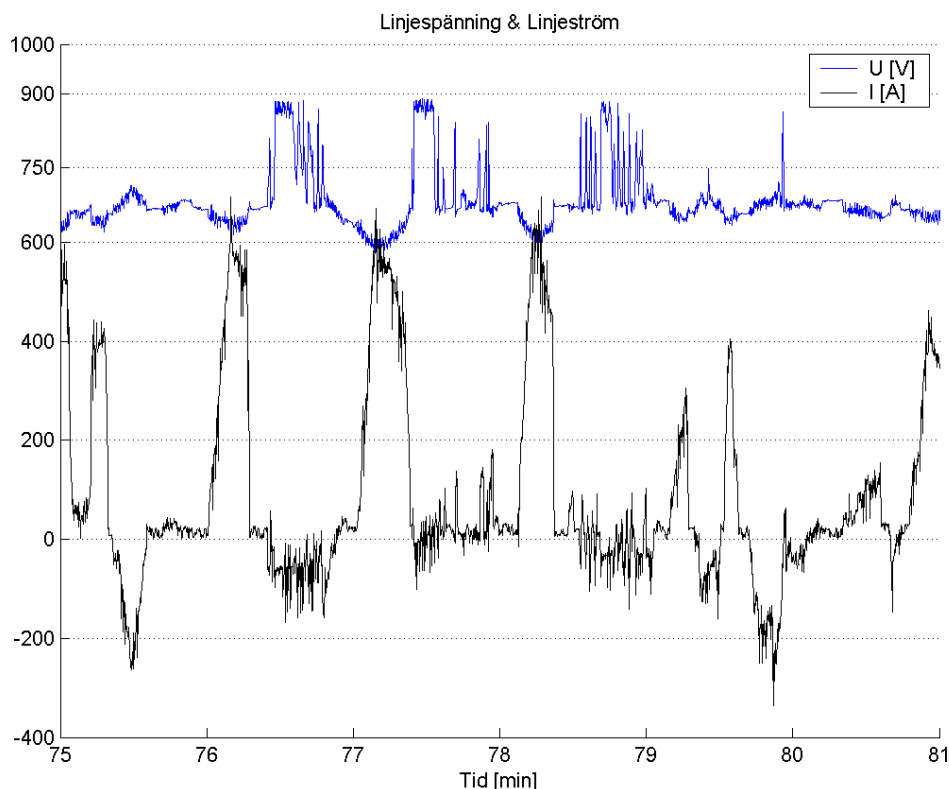


Fig.10 Linje-spänning och -ström vid samma tid som figur 9

4.1.2 Oscilloskopsmätningen

Oscilloskopets inbyggda minne tillsammans med den inbyggda skrivaren gör det möjligt att skriva ut intressanta sekvenser. Följande signaler kopplades till oscilloskopet: linjespänning, linjeström, motorström 1, styrsignalen till överspänningsomriktaren -USÖ och deblockeringsignalen till överspänningsomriktaren . Styrsignalerna till omriktaren togs från styrkort YYR 151 och vöriga från "mätlådan".

I utskrifterna är samplingsintervallet $280\mu\text{s}$ och tidsintervallet är 500ms/div .

Tabell 10 Signalförteckning, figur 11-13.

Signal 1, (1)	Kontaktledningspänning	500-1000V, 50v/div
Signal 2, (2)	Motorström	100A/div
Signal 3, (3)	-USÖ	1V/div
Signal 4, (4)	Linjeström	100A/div
Signal 5,(5)	Debl.USÖ	5V/div

Chalmerstunneln var intressant ut mätsynpunkt med dess nivåskillnad samt att den är en egen fristående kontaktledningssektion. Utskriften i fig 11 visar en ca 12 sekunder lång bromsning i slutet av Chalmerstunneln. Bromsningen kan anses vara normal men den ger ändå en god indikation på hur systemet arbetar. Spänningen på kontaktledningen (1) ökar från 740V till precis över 900V, med en topp på ca 930V i början av förloppet. Med ökad motorström (2), ökar utstyrningsgraden på överspänningsomriktaren -USÖ (3) för hålla kontaktledningsspänningen (1) på maximalt 900V. Motorströmmen (2) är direkt proportionell mot bromskraften.

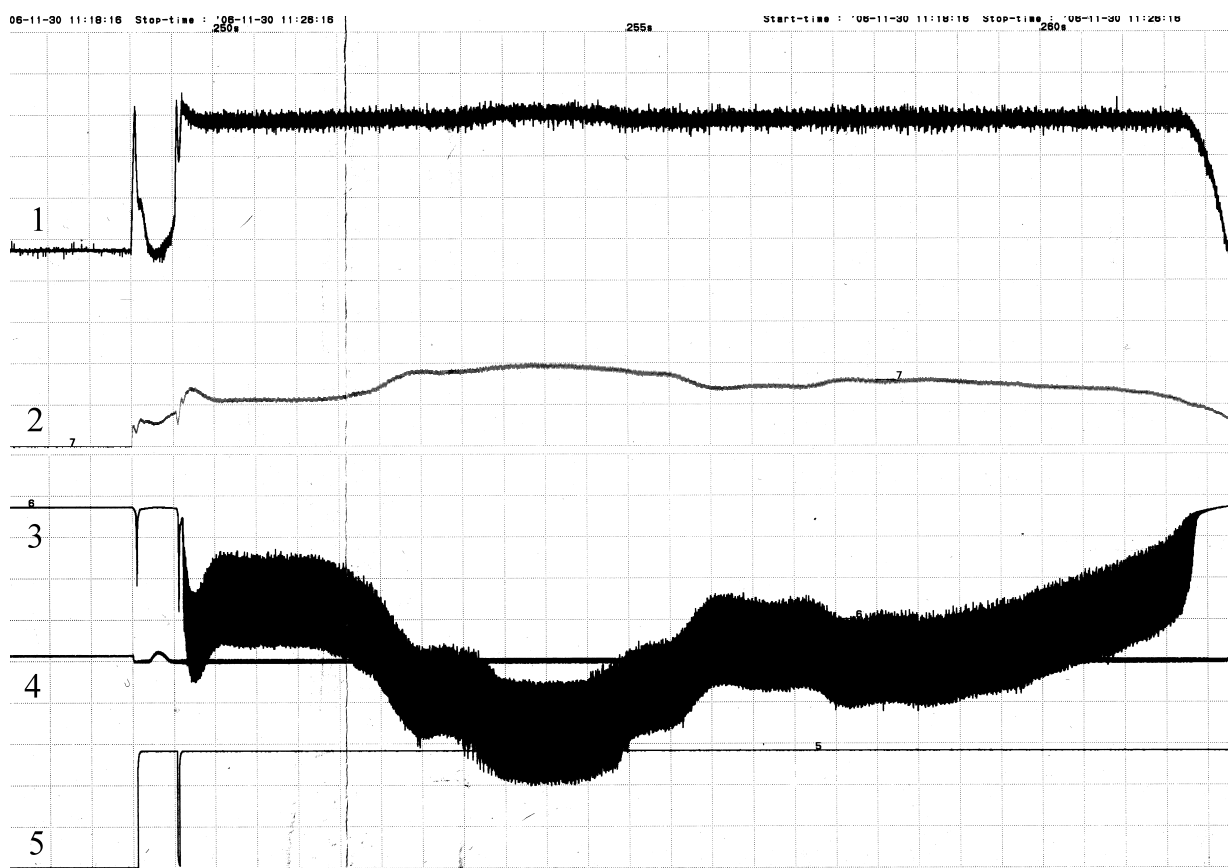


Fig.11 Bromsning Chalmerstunnel nerför

I fig 12, även den tagen från bromsning nerför Chalmerstunnel kan man följa den negativa linjeströmmen (4). Den visar att vi i början av denna bromsning (fig 12, notering 1) återmatas energi till kontaktledningsnätet. Vid denna tidpunkt är det en låg aktivitet på styrsignalen till överspänningsomriktaren (3).

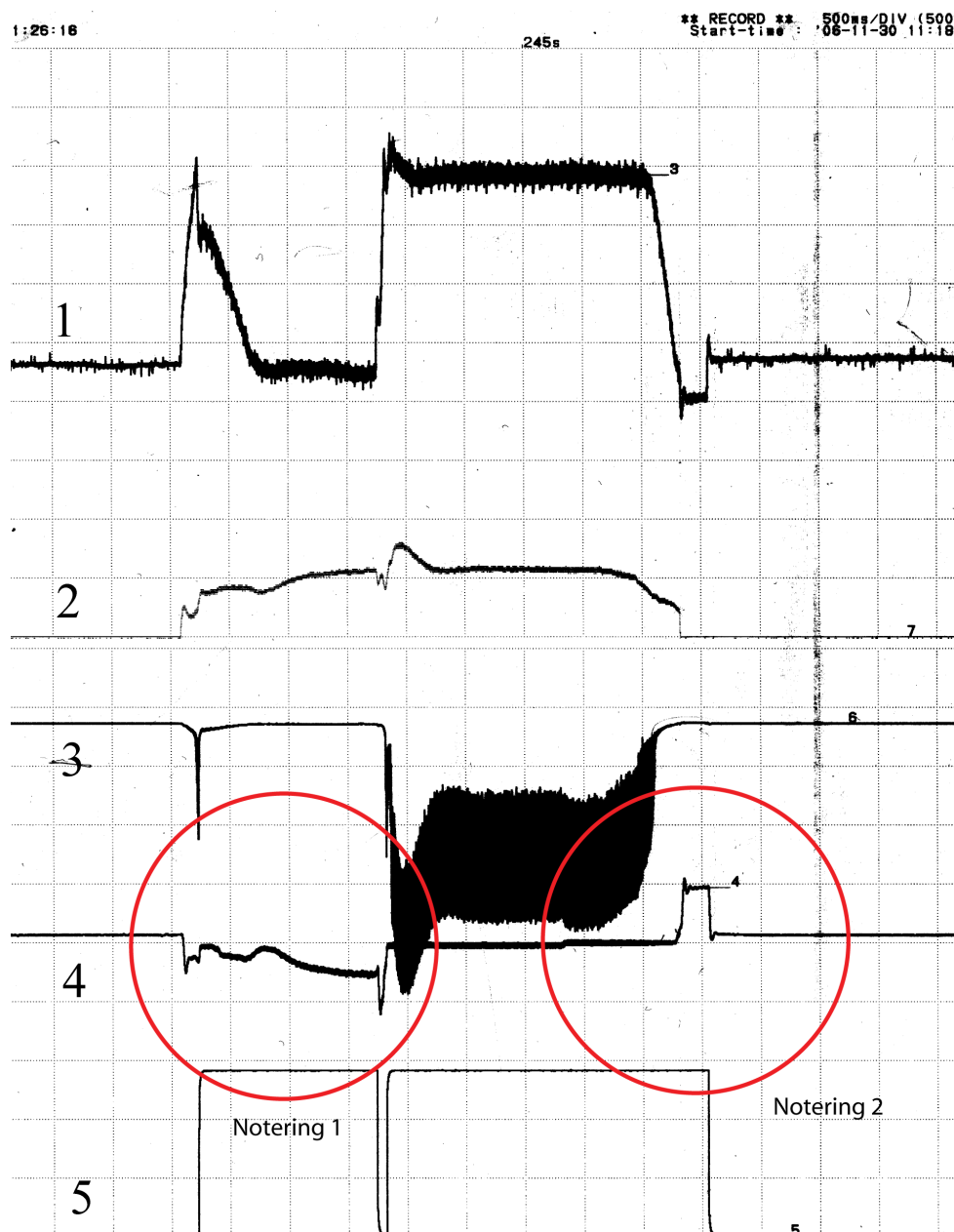


Fig.12 Bromsning Chalmerstunneln nerför

Intressant att notera här är att när bromsningen upphör (fig 12, notering 2) så bränner vagnen energi från nätet. Under ca 300ms dras 100A från nätet vilket resulterar i att kontaktledningsspänningen (1) sjunker till ca 700V. Detta är ett fenomen som observerats under ett flertal tillfällen. Man kan se att styrsignalen till överspänningsomriktaren (3) har antagit positivt värde, vilket borde innebära att överspänningsomriktarens läcks, men trots det hänger överspänningsomriktaren kvar i öppet läge en kortare tid.

De på kontaktledningen (1) uppmätta spänningarna visar sig variera kraftigt, relativt snabbt. På följande utskrift, fig 13 från Kageledstorget mot Östra sjukhuset, observeras ett flertal snabba spänningstoppar där spänningen ökar från 680V till 900V. När spänningen sjunker under tröskelnivån, fig 13 not 1, slår överspänningsomriktaren av. Då motorerna fortfarande genererar ström när detta sker kommer den ge upphov till en hastig spänningsökning vilket återigen triggar överspänningsomriktaren. Hade även bromsströmmen varit ett ingångsvärde till reglerutrustningen hade man i många fall kunnat göra spänningsregleringen mer följsam.

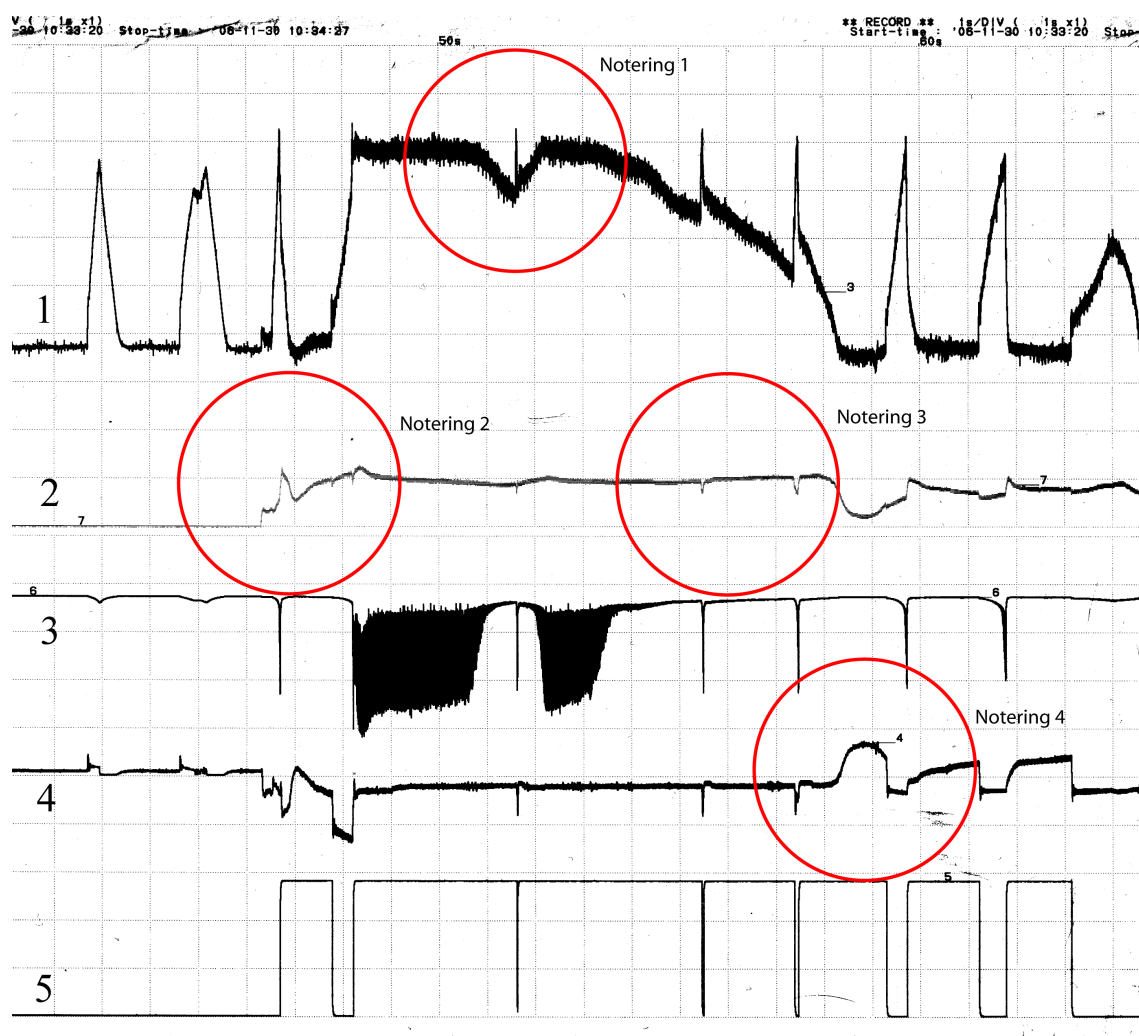


Fig.13 Kageledstorget – Ättehögsgatan

Ytterligare en sak värd att notera är de toppar i motorströmmen (fig 13, notering 2) som uppstår när överspänningsomriktaren öppnar. Detta uppstår när ingen vagn som förbrukar energi finns på sektionen då överspänningsomriktaren öppnas. När bromsmotståndet kommer in som belastning ökar motorströmen och därmed ökar bromskraften ender en kort tid tills ankarströmsregulatorerna styr ner ankarströmmen.

På samma sätt ser vi dippar i motorströmmen när överspänningsomriktaren slår av (fig 13, notering 3). Dessa hastiga förändringar i bromsström upplevs som ryckningar vid bromsning.

Även här kan vi se att vagnen drar ström från kontaktledningen under bromsfasen (fig 13, notering 4)

4.2 Kontaktledningsmätningar, egna samt utförda av Göteborg energi

För att undersöka hur vanligt förekommande och hur stora överspänningarna på kontaktledningsnätet är installerades en loggerutrustning i en likriktarstation. På så vis kunde spänningsvariationerna på kontaktlinjen övervakas under en längre tid.

4.2.1 Tidigare mätningar gjorda av Göteborg energi

I början av 2005 gjorde Göteborg energi på uppdrag av Göteborgs Spårvägar mätningar av spänningsnivån på kontaktledningsnätet. Mätningarna skedde i likriktarstationer på ett flertal ställen runt om i Göteborg. De mätutskrifter vi har tagit del av är gjorda på L35 Holtermansgatan (Chalmers), L39 Sankt Pedersgatan (Gamlestadstorget) samt L20 Minutgatan (Kortedala). Exakt hur mätningarna utförts vet vi inte men troligtvis har en logger som samplat varannan sekund använts. På samtliga mätplatser har spänningsnivåer på mellan 930 volt och 950 volt uppmätts (bilaga 2). Värt att notera är den långsamma samplingsfrekvensen som kan ha gjort att de högsta spänningstopparna missats.

4.2.2 Egna mätningar på Holtermansgatan

Utifrån de mätningar som gjorts ifrån övningsvagn samt de tidigare mätningarna utförda av Göteborg energi beslutades att det intressantaste stället att logga spänningsnivåer är i Chalmerstunneln. Kontaktledningen i de båda tunnelrören består av en sektion, isolerad från de angränsande sektionerna. Sektionen i tunneln är kort och har en kraftig lutning vilket kan antas ge upphov till långa bromsningar utan återmatning. En dataloggerutrustning placerades således i likriktarstationen på Holtermansgatan (Chalmers) och anslöts på tunnelsektionen.

Dataloggern kopplades in på befintlig strömslinga i likriktarstationen, där 0-1 mA motsvarar 0-1000V, med ett motstånd och spänningsmätning över detta. Spänningen mättes med en 10-bitars AD-omvandlare som anslöts till en pc via en optokopplare för att sedan lagras i en fil. Samplingsfrekvensen valdes till 10Hz då det ansågs vara tillräcklig noggrant för att detektera spikar men utan att generera onödigt mycket mätdata.

Vid senare analys av datan visade det sig att 14 888 967 stycken mätpunkter hade genererats under 16 dagarnas datainsamlande. (från 2/4 kl 13.08:48 till 19/4 kl 12.58:38). Behandling av mätdata i Matlab gav att kontaktledningsspänningen överskred 900 V vid 77902 tillfällen och 930 V vid 492 tillfällen. Värden över 950 V hittades vid 12 tillfällen. Vidare undersöktes hur många pulser längre än 5 mätvärden (0,5 s) som observerats vid respektive spänningsnivå. Pulser över 900 V hittades vid 703 tillfällen och över 910 V 210 gånger. Över 920 V hittades inga pulser längre än 0,5 s. Flertalet av de värden över 900 V är alltså enstaka värden, varaktiga under enbart några tiondels sekunder.

Fördelningen av kontaktledningsspänningen under en dag har plottats i fig 14. Där syns det att spänningen i normala fall ligger på 730-760 V och att spänningen vid återmatning ligger som en topp vid 880 V, med en spridning mellan 840 V och 920 V, fig 15. De spänningsvärden neråt 650 V och toppen vid 700 V är resultat av det spänningsfall som uppkommer när uppåtgående vagnar drar ström i "drivläge".

På liknande sätt har fördelningen under en natt plottats i fig 16. Eftersom inga spårvagnar trafikerar linjen syns varken "återmatningstopparna" eller spänningsfallet när vagnarna drar ström.

För att visa hur mycket spänningen varierar under dagen i förhållande till hur den varierar på natten gjordes en plott under en längre tid, fig 17. I plotten har medelvärdet över en minut använts, dels för att öka hanterbarheten samt att få bort extremvärden. Man kan tydligt se skillnaden mellan dag och nattvärde, då spänningen under natten varierar mycket lite.

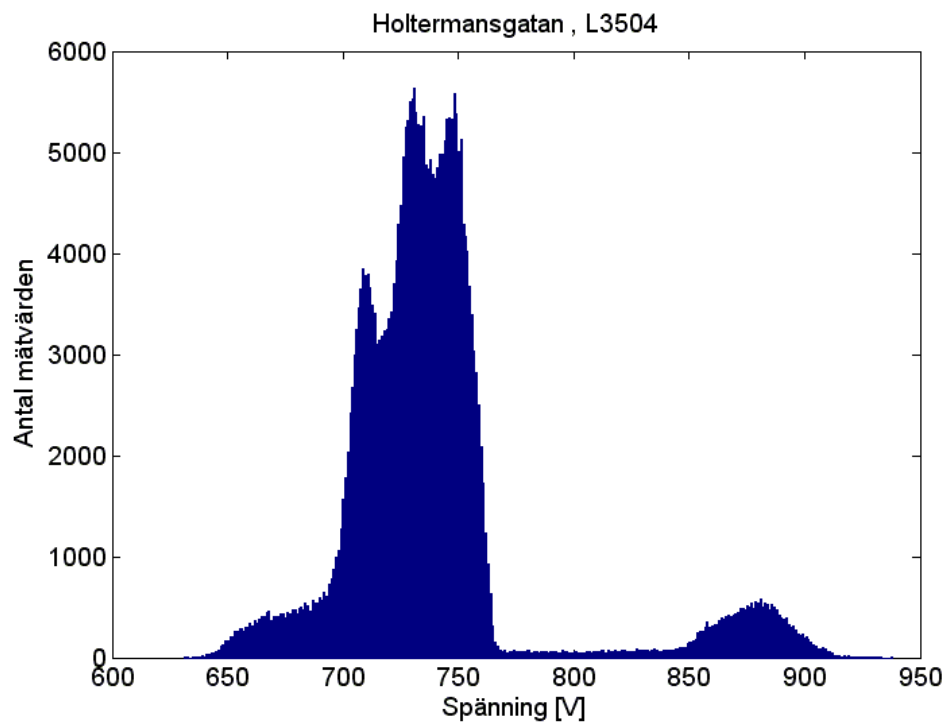


Fig.14 Spänningsfördelning över en dag

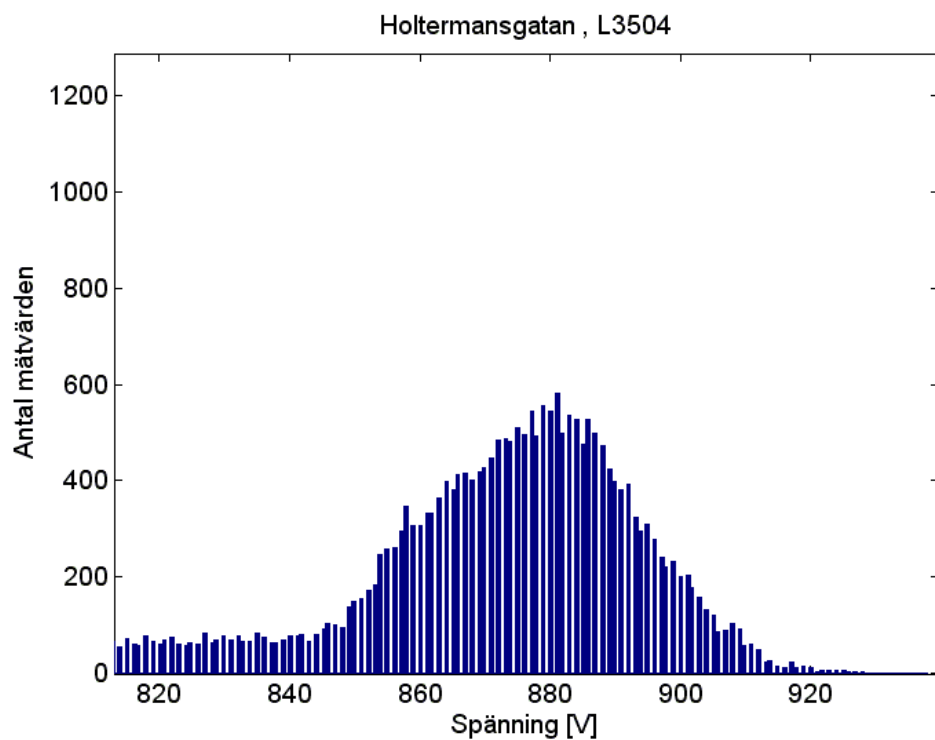


Fig.15 Spänningsfördelning inzoom höga spänningar

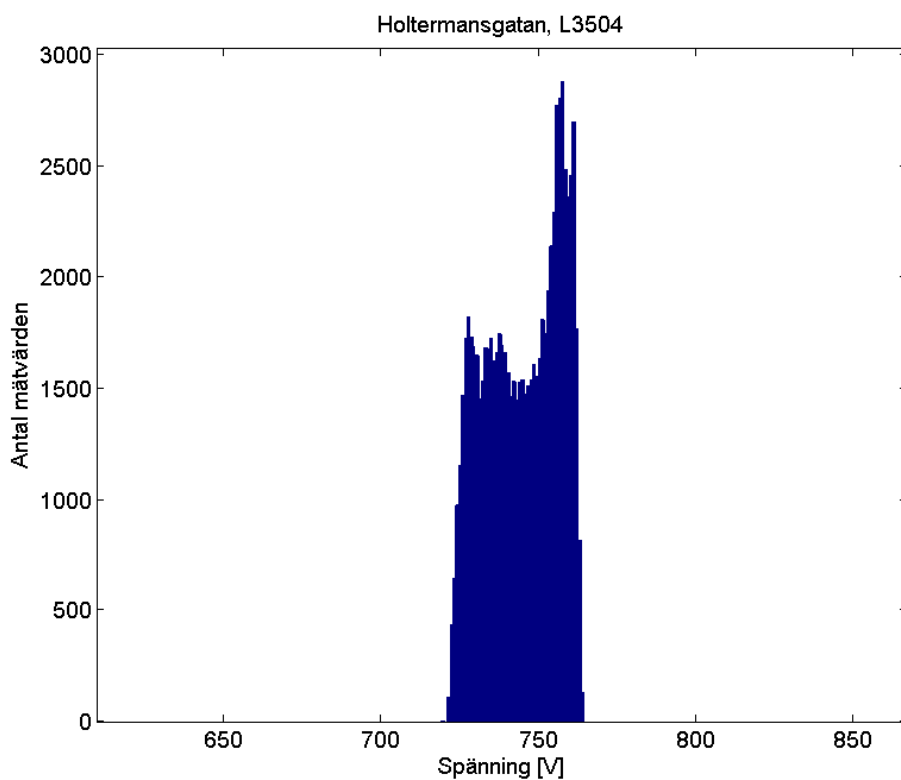


Fig.16 Spänningsfördelning natt

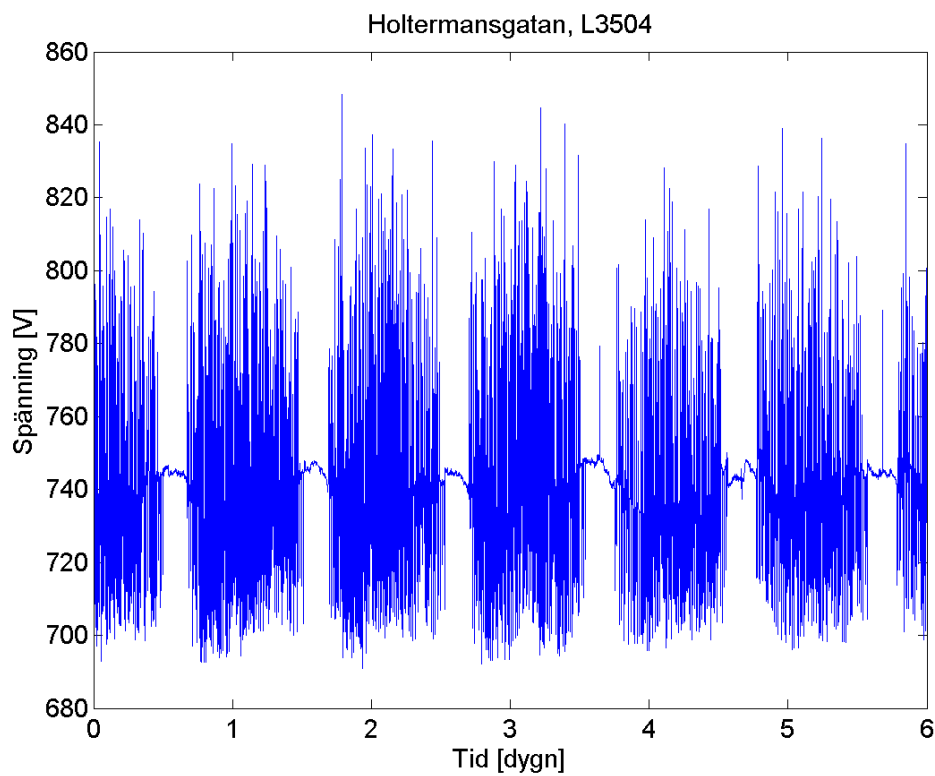


Fig.17 Spänningsvariation över 6 dagar.

5 Slutsatser

Våra slutsatser från mätningar i och kring M31 samt studier av vagnen både i teori och praktik delas här upp under ett antal rubriker. Vissa slutsatser förekommer under flera rubriker och syftet med detta är att varje rubrik och text kan användas var för sig.

5.1 Förekomsten av överspänningar

När det gäller förekomsten av överspänningar, har det visat sig att extremt höga spänningsnivåer upp emot 1000V inte är vanligt förekommande. Däremot har mätningar på M31 visat att återmatningen ofta ligger mellan 880V och 900V, vilket är 17% högre än den nominella linjespänningen. Under 16 dagars linjespänningssmätning uppmättes t.ex 77K mätvärden över 900V varav flera var över 930V.

Andra mätningar har visat att spänningsderivatan, vid bromsning är hög och att regulatören inte klarar de hastiga förloppen vilket resulterar i spänningsspicar på stundtals över 920V. Detta bekräftas av kontaktledningsmätningen, då varaktigeten på pulserna över 900V är kort, de flesta är kortare än 0,5 s.

Man ska inte stirra sig blind på ovanstående mätvärden, i och med att långtidsmätningen av linjespänningen skedde i likriktarstationen så kan spänningen som vagnen upplever vara högre, då avståndet till spänningskällan är mindre.

Tidigare uppmätta spänningar på runt 950V är troligen orsakade av enskilda vagnindivider i vissa situationer snarare än ett generellt fel. Orsakerna på dessa vagnar kan vara tex. fel på styrkortet till spänningsreglering, snabba simultana bromsförlopp eller störningar på vagnens spänningsmätning..

Att återmatningen ligger på gränsen av den tillåtna spänningen (900V) samtidigt som regleringen inte klarar hastiga spänningsspulser är ett bekymmer och något som bör åtgärdas.

5.2 Orsaker till kontaktledningsspänning över 900V

Så som överspänningsregulatören är ställd i dagsläget, dvs samma som från leverans, är spänningsnivåer runt 900V vid återmatning, "naturligt" förekommande. Med naturligt menas här att det inte är förvånande utan snarare beter den sig som specificerat. Vidare finns i regulatorns design en fördröjning som indirekt ger spänningstopparna i början av en bromsning utan återmatning. Vi gör därmed bedömningen att detta uppträdande har präglat M21/31 ända sedan leverans och eventuella förändringar sedan dess har vart marginella.

Den verkstadskontroll som har genomförts av överspänningsomriktaren och regulatorn har som konstaterats inte givit det resultat som avsågs, mestadels pga. otydligheter i utförande och syftet med kontrollen. I kap 7.1 har vi skrivit ett förslag till revision av denna kontroll, om den önskas genomföras åter.

Efter att ha hört oss för om kontrollen och resultatet från denna har vi konstaterat att, elverkstaden har vid höga värden i verkstadskontrollen bytt regulatorkort, YYR 151 mot ett hämtat ur förråd. Enligt elverkstaden har utbytta kort skickats till elektronikverkstaden och då vi frågade elektronikverkstaden så var svaret att de endast sett ett fåtal kort och dessa har inte uppvisat felaktiga värden eller felaktig funktion.[]

Vår uppfattning om kontrollen är att, med denna kan man hitta eventuella vagnar med felaktiga överspänningsregulatorer alt. överspänningsomriktare, men vi bedömer inte att detta är ett frekvent problem. Ett fel i antingen regulator eller omriktare leder troligen till bortfall av hela överspänningskontrollen snarare än en viss höjning av återmatningsspänningen.

5.3 Konsekvenser av höga spänningar

En förhöjd kontaktledningsspänning leder bland annat till ökat slitage på pedalvagnarnas omformare samt kompressorer då dessa är direktdrivna från 750V och deras varvtal är proportionellt mot spänningen. Pedalvagnarna är konstruerade för 600V linjespänning och när dessa får en linjespänning om 900V då en M31'a återmatar i närheten så går ju dessa med 150% spänning.

Omformaren på M28 har en laddningsregulator som ska hålla en någorlunda konstant spänning genom att styra generatorfältet. Denna får vid pulserande linjespänning jobba hårt för att anpassa sig, en fördel med denna är att omformarmotorns last inte ökar linjärt med linjespänningen, vilket annars hade vart fallet.

Kompressorerna däremot har inte någon regulator och får således en ökad belastning då spänningen och därmed varvtalet höjs. Det är högst sannolikt att återmatningen från M21/31 i dagens form har och kommer vara den direkta orsaken till haverier på omformare och kompressorer.

Det är dock svårt att med statistik visa att det är M21/31's återmatning som orsakar haverier, detta pga. det var 20år sedan M21 infördes och haveristatistik från tiden innan antingen är förträngd eller har liten relevans pga. åldringen av pedalvagnarna. Därför har vi inte lagt någon kraft på att samla data och statistik för haverier och nöjer oss med att konstatera att hög återmatningsspänning med stor sannolikhet har påskyndat elektriska slitaget av kompressorer, omformare och troligen även banmotorer i pedalvagnar.

Huruvida M31's egna elsystem tar skada av den höga återmatningsspänningen är oklart, men komponenter med högt elektriskt fält, t.ex. kondensatorer påverkas negativt av att gå på höga spänningar och synnerhet av ett pulserade förlopp. Troligen ger inte spänningstopparna någon direkt ökad risk för överslag i motorer på M31 men indirekt i samband med åldringen och mekaniskt slitage så finns det viss risk.

Vid utprovningen av M32 konstaterades en del problem, där orsaken inte helt osannolikt är hög linjespänning. Bland annat har styrningen av motormoduler blockerat pådrag och broms pga hög linjespänning. Vi har i detta arbete inte studerat M32 och dess system närmare då leverantören av dessa vagnar har arbetat med att minska dessa problem och verkar ha lyckats att begränsa dem.

Värt att notera är att i specifikationen till Ansaldo-Breda för M32 anges linjespänningen till 750V (+20% -15%) och våra mätvärden visar att spänningen inte helt sällan överskrider denna specifikation under kortare perioder.

5.4 Konsekvenser av överspänningsregulatorns tröghet

Eftersom överspänningsregulatorn, YYR 151 har en viss tröghet och endast mäter på linjespänningen så påverkas förutom spänningspulser på linjespänningen bland annat bromsegenskaperna till viss del. I utdata ifrån vagnmätningarna är det ganska lätt att se hur motorströmmarna i bromsning får pulseringar då överspänningsomriktaren slår till respektive från. Detta upplevs fysiskt i vagnen som störningar i bromskraften och därmed som ryckningar i vagnen.

Detta är troligen inte ett större problem, men det finns en poäng i att lyfta fram orsakerna till detta "fenomen".

Pulserna på linjespänningen är ett större bekymmer, men då dessa kan anses vara överspänningar avhandlas det i kap. 6.3

En metod att åtgärda pulseringen är att konstruera en ny regulator som tar hänsyn till hur föraren begär broms antingen från bromsreferensen eller genom att mäta motorströmmarna.

6 Rekommendationer & förslag till fortsatt arbete

6.1 Övervakning av linjespänning

En automatisk övervakning av linjespänningen i en eller flera likriktarstationer skulle kunna vara ett möjligt sätt att upptäcka enskilda vagnindivider som genererar för hög spänning vid återmatning. Detta skulle kunna bestå av ett enkelt system som reagerar på spänningar över en viss nivå, t.ex. 930V och då skriver tidpunkt samt spänning. Gärna ett antal mätpunkter runt överspänningen för bättre analys av vad som inträffat. Exempelvis 20Hz samlingsfrekvens, 200 samples på var sida om pulsens passage av trignivån samt alla mätvärden över trignivån.

Identifiering av vagnar är nödvändigt men detta borde kunna lösas med its4mobility- (f.d. KomFram-) systemet med dess slingor på fasta platser.

6.2 Modifiering av reglersystem och överspänningsomriktare

Ett reglersystem som dels har bromsreferens alt. motorström som ingångsvärde samt reagerar snabbare på den egna vagnens bromsning skulle innebära att återmatningsspänningen kunde sänkas samt att spikar och störningar i linjespänningen skulle kunna minskas drastiskt.

En omriktare som tillåter lägre utstyrningsgrad än 13% är att föredra, i dagsläget så kan överspänningsomriktaren inte ta hand om bromseffekter under 80 kW på ett bra sätt. Att kunna ta hand om små effekter vore en stor fördel, dessutom behöver den antagligen vara snabbare än dagens, en switchfrekvens på ett par kHz vore att föredra.

Att sänka spänningsregleringens tröskelnivåer på styrkortet YYR 151 hade troligtvis varit det enklaste sättet att bli av med spänningar över 900V. Detta kräver dock en utredning om hur bromskraften förändras och hur överspänningsomriktaren mår under ombyggnadsfasen. då ett par vagnar har fått sänkt spänning kommer dessa att bromsa för andra vagnar, eftersom de ombyggda vagnarnas överspänningsomriktare börjar leda tidigare.

Vi har funderat kring belastningen på överspänningsmotståndet vid en sänkt spänning och effektutvecklingen kommer att stanna kvar på ungefär samma nivå som idag, skillnaden blir endast att omriktaren kommer att gå på en högre utstyrning och således leverera mer ström till motståndet. Maximala bromseffekten kommer inte heller att påverkas negativt, vid en linjespänning under återmatning på 800V kan motståndet fortfarande ge ca 750kW och om ytterligare effekt behövs vid tex. en nödsituation så finns det inte något som hindrar att spänningen höjs mot dagens nivåer på 900V temporärt. 900V kan maximalt ge en bromseffekt på ca 1MW, vilket är precis som i dag.

6.3 Uppdatering av verkstadskontroll

Vi har konstaterat att verkstadskontrollen inte ger korrekta mätvärden, främst pga. det inte framgår vad för mätvärde som utföraren letar efter.

Målet med mätningen är att hitta spänningen när omriktaren börjar leda för en långsamt ökande kontaktledningsspänning, som i detta test simuleras med en potentiometer. Regulatorn för överspänningsomriktaren har bland annat en integrerande del, som är en aning fördröjd för långsamma signaler så en hastig uppvridning ger inte korrekt resultat.

Förslag till genomförande:

- Koppla upp enligt befintlig kontroll
- Sätt med vridpotentiometer spänningen till 8.00V, ingen aktivitet ska höras/märkas.
- Vrid upp till 8.5V, fortsätt sedan sakta uppåt i spänning, ca 0,05V per sekund. Mellan 8.60 och 9.00 V ska omriktaren starta (lyssna efter "ljudet"), tänk på att det tar ett par milli sekunder för den att starta, läs av värde, vrid snabbt ner ca 0.1V och kontrollera att omriktaren slutar leda.
- Anteckna värdet du läste av, precis när omriktaren började leda.
- Vrid sedan upp till 9,4V och läs av multimeter kopplad över motståndet, den ska visa 500-600V vilket är ungefär 0.8 gånger aktuell linjespänning.
- Efter någon sekund skall linjebrytaren lösa ut, om den ej gör detta vrid hastigt ner potentiometern så att den hamnar kring 750V. (ej utlöst linjebrytare indikerar antingen att motståndet inte leder fullt eller att "linjeström minus motorström" mätningen inte fungerar).
- Om den simulerade kontaktlinjespänningen visar sig vara över 9,10V ska kortet bytas till ett nytt. Testa sedan igen för att verifiera att det just var det utbytta kortet som var felaktigt.
- Felaktiga kort ska kontrolleras, t.ex. enligt principen som vi använde i avsnitt 3.1.

Vidare kan man med den signal (06) som bortkopplas från kortet mäta linjespänningen vilket kan vara av intresse, om spänningen över motståndet visar sig vara låg.

7 Källor och referenser

Skrivna källor

- [1] ABB Traction AB, Fordonsbeskrivning spårvagn M21, rev 1.
- [2] ABB Traction AB, Teknisk beskrivning TKR 88501GS, GS/M21- traktionsreglering.
- [3] ABB Traction AB , Beskrivning LS-omriktare YZSF 750-A till spårvagn M21 (1988).
- [4] Göteborgs spårvägar, Kretsschema M31, ändringsdatum 060307
- [5] ASEA Automation, Kortbeskrivning YYR 151, Överspänningsregulator YT 553 001-AN (1985).
- [6] ASEA, Kortbeskrivning YYX 140, Styrpulsdon YT 637 001-CG (1984)
- [7] ASEA, Kortbeskrivning YYU 128, Styrpulsförstärkare YT 637 001-BC (1984)

Muntliga källor, GS

Jan Ågren, erfarenheter GS-vagnar samt M32

Tommy Åkerblom, praktiska erfarenheter samtliga GS-vagnar

Kent Lindahl, trafikering samt information om vagnrörelser i samband med mätningar

Göran Andersson, information angående verkstadskontrollen och dess utförande.

Jan Rasmussen, information från elektronikverkstad.

Muntliga källor, övriga

Lars Hammarsson, Göteborg Energi, linjespänningsmätningar

Yngve Hammenius, CTH, information om magnetfält kring kontaktledning i chalmerstunneln

Ritningar

Samtliga från ovannämnda skriftliga källor

Fotografier

Samtliga tagna av Filip Pettersson.

8 Bilagor

8.1 Avskrift av instruktion för verkstadskontroll

Test av överspänningschopper

Avaktivera och slå ifrån spänningen på luftledningen, jorda vagnen

Ta ur kretskort S4.2.109 (YYR 151A) i styrpulsramverket.

Sätt i förlängningskortet och placera ovan nämnda kort i förlängningskortet.

Anslut potentiometer enligt följande.

+ 15V tas från ingång 01 på YYR 151A.

0V tas frånutgång 10 på framsidan av YYR 151A.

06 tas från den lösa kabel som är ansluten på förlängningskortet.

Anslut en voltmeter över 06 och 0V

Anslut en voltmeter över bromsmotståndet A1.3 uttag 41 (+) och 42 (-) mätområde 1000V DC.

Aktivera vagnen.

Observera voltmeter som är ansluten till bromsmotståndet. Voltmeter visar 0V. Om inte avaktivera och felsök. Om det är OK gå vidare.

Vrid sakta upp potentiometern när voltmeter som är ansluten mellan 06 och 0V visar 9,5V +/-0,1V ska överspänningsomriktaren starta. Spänningen över bromsmotståndet skall då vara mellan 500 – 600V.

Obs. efter ett kort ögonblick löser linjebrytare ut.

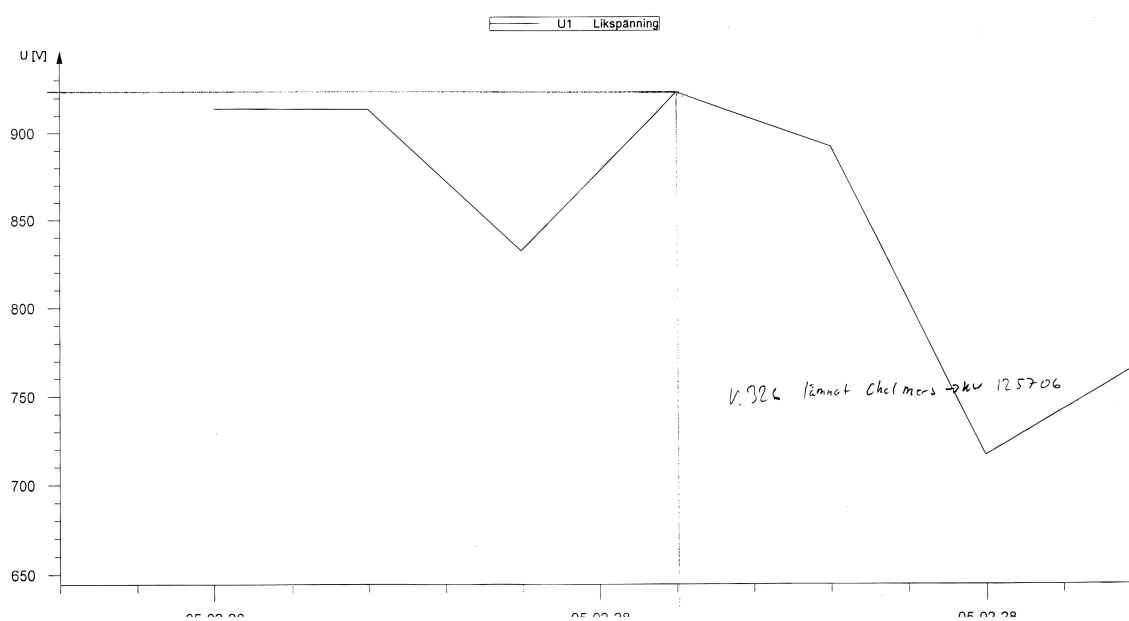
Avaktivera och slå ifrån spänningen på luftledningen, jorda vagnen.

Återställ kretskort YYR 152A och ta bort voltmeter och kabel till bromsmotståndet.

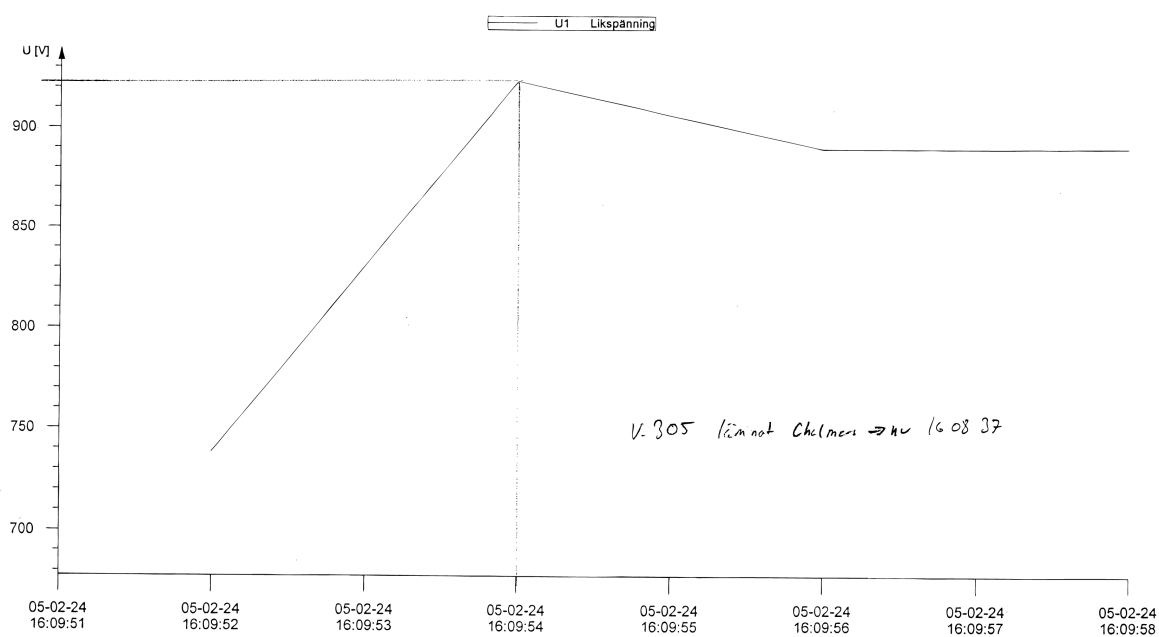
Aktivera.

8.2 Utskrifter från linjemätningar av Göteborg Energi

L35.pdf	L35 Holtermansgatan		Plats
	Kommentar		Datum 2005-03-07
			Handläggare C.Roxenius

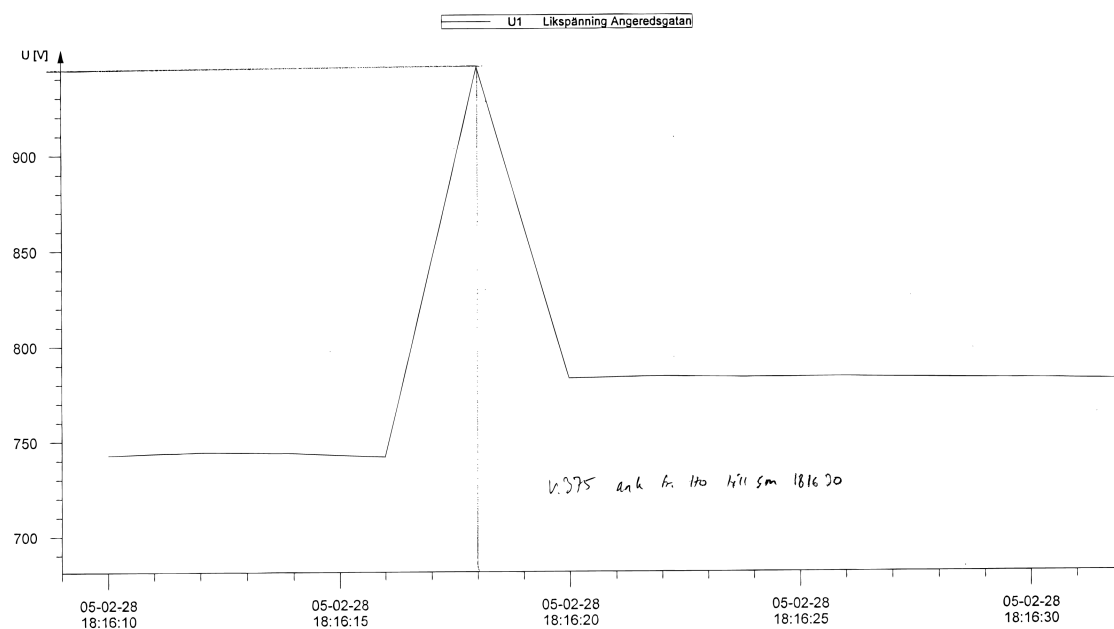


L35.pdf	L35 Holtermansgatan		Plats
	Kommentar		Datum 2005-03-07
			Handläggare C.Roxenius



Utskrifter från linjemätningar av Göteborg Energi (forts)

	L39 Sankt Pedersgatan	Plats
		Datum 2005-03-07
L39.pf1		Kommentar
		Handläggare C.Roxenius



L20.p11	L20 Minutgatan	Plats
		Datum 2005-03-07
	Kommentar	Handläggare C.Roxenius

