

Spänningshållfasthet hos hemelektronik



Peter Olsson

Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation
Lund University

Abstract

This report investigates the cause of transients and over voltages in the grid when breakers operate and when a fault occurs. This is done by analysing literature and by performing simulations and experiments. The results were used to explain the cause of breakdown of electronics in two different occasions. In one breakdown a number of computer network switches was destroyed when a cable was energized against a short circuit and in the other breakdown, a computer and a videocassette recorder were destroyed when the grid was energized after a shorter interruption.

The results from simulations in the program PSCAD/EMTDC were analysed to get a better understanding of which influence different components have on the voltage in the grid. The results showed that when capacitors are energized the oscillation between the capacitance and the inductance in the grid can introduce over voltage in the range of some hundred volts at the 230 V level. The results also showed that when the capacitance was small or when the resistive load was large very little or no over voltage was generated. Voltage and current were measured in the laboratory when a capacitor was energized to verify the simulations. Neither the simulation results nor in the experimental results showed that the currents and voltages that occurred when a capacitor is energized should destroy the electronics.

A simulation model of a fuse was made and used to analyse which influence the parameters in the circuit has on the over voltage that occurs due to network inductance when the current no longer can flow. The results showed that the voltage can raise to a level of some kV depending of how fast the current stops to flow and how large the load in the circuit are. The larger the load was the smaller became the over voltage. The model was based on measurements on short circuit tests made in the laboratory. In these tests voltages of around 1 kV were induced by the inductance in the grid. The results from the simulation and the tests in the laboratory indicate that short circuits can generate voltage that can destroy electronics. In the laboratory a computer screen was exposed to this type of over voltages up to 1,5 kV a number of times but without any breakdown occurring. This is in agreement with standards that state that voltages up to 1,5 kV can be expected on the grid and therefore would all equipment should be immune up to this voltage level.

Abstract	1
Tillkännagivande	3
Inledning	4
Elektronik.....	5
Intervju	5
Beskrivning av ett nätaggregat.....	5
Krav på apparaters tålighet mot transienter	6
Skadestånd och ansvar vid transienter i elnätet	7
Laboratorietest av elektronik	8
Litteratursökning.....	9
Simulering.....	11
Om simuleringsverktyget.....	11
Simulering av ett fiktivt elnät	11
Inkoppling av kondensator	14
Jordfel	16
Kortslutning	20
Diskussion Om simuleringarna.....	21
Simulering av säkring	22
Simulering av brytning av induktiv ström	25
Diskussion.....	28
Simulering av fall 3, tillslag efter service	29
Diskussion.....	33
Laboratorietest	34
Kortslutningsprov	34
Beräkning av kretsens parametrar.....	35
Uppmätta resultat	36
Kortslutningsprov med extra induktans	40
Uppmätta resultat	40
Beräkning av kortslutningsströmmar	42
Kondensator tillkoppling	45
Uppmätta resultat	45
Numerisk lösning av systemets ekvation.....	48
Sammanfattande bild om transienter i elnätet.....	50
Diskussion.....	50
Förslag till fortsatt arbete	51
Appendix A.....	53
Tabeller	53
Appendix B	54
Matlabkod för lösning av kortslutningsekvationen.....	54
Matlabkod för lösning av kondensatorekvationerna.....	54
Appendix C	55
Simuleringsmodell av ett nätaggregat.....	55
Simuleringsmodell av elnätet vid datorhaveriet	56
Referenser	57

Tillkännagivande

Jag vill tacka alla på institutionen för Industriell Elektroteknik och Automation som hjälpt mig med arbetet. Speciellt vill jag tacka mina handledare Olof Samuelsson och Sture Lindahl.

Jag vill även tacka mina kollegor på Staffanstorps Energi AB för deras hjälp med bland annat mätningar.

Detta arbetet utfördes på initiativ av Olle Corfitsson på Öresundskraft med stöd av Elforsk.

Inledning

Om elnätet drabbas av driftstörningar och därmed blir spänningslöst händer det ibland att elektroniken hos en kund havererar. Tre sådana tillfällen finns dokumenterade hos Öresundskraft AB. Det första tillfället var då 7400 kunder var utan ström i 1,5 minuter. Vid spänningssättningen drabbades en kund av att datorns hårdvara samt skärm började brinna, trots att båda vid detta tillfälle var avslagna. Vidare havererade videon.

Vid det andra tillfället kortslöts en 6 kV kabel i samband med spänningsomläggning till 10 kV. Matande brytare bröt bort felet inom cirka 0,1 s och efter cirka 10 minuter återfick kunderna strömmen. Vid denna händelse havererade ett antal apparater i en grafisk industri som var matad från en nätstation placerad mellan brytaren och felet.

Vid det tredje tillfället hade 19 hubbar havererat sedan en fabrik hade spänningssatts efter utförd service på dess elanläggning. Vid servicen var en 25 MVA transformator och ett 3,2 MVA shuntkondensator tagna ur drift och lasten var vid tillfället liten.

Ovan beskrivna händelser leder ibland till diskussioner mellan nätägare, elkund och försäkringsbolag om vem som har ansvaret för haveriet. Därför är det ett angeläget intresse att undersöka och sammanställa olika tänkbara orsaker till dessa haverier. Som bakomliggande orsak till de tre olika haverierna kan tre olika teorier framföras.

Till den först beskrivna händelsen, nämligen den då en dator och en video drabbades, finns tre olika teorier om haveriorsaken:

- Antag att samtliga apparater som havererade var anslutna på samma fas och att videon var påslagen eller i vänteläge. Vid spänningssättning havererade denna av någon intern orsak eller av någon liten överspänning. Vid detta haveri inducerades en överspänning som förstörde den närmsta elektroniken, det vill säga datorn.
- Kapacitansen i elnätet bildar så stora strömmar vid spänningssättningen att stora spänningar induceras över nätets induktans.
- Resonans mellan kapacitanser och induktanser kan ha bildat spänningar som gjort att elektroniken havererade.

Till den andra händelsen, som alltså inträffade i en grafisk industri, finns följande teori:

- Kortslutningsströmmen inducerar energi i nätets induktanser där det bildas stora spänningar som kan ha orsakat haveriet.

Till den tredje händelsen, då 19 hubbar havererade, är teorin som följer:

- Oscillation vid tillslaget mellan kondensatorbatteriet och induktanserna i till exempel transformatorn inducerade stora spänningar som ledde till haverierna.

Målet med detta arbete är att förbättra kunskapen om vilka transienter som normalt uppkommer i elnätet och hur dessa påverkar elektroniken och med hjälp av kunskap förklara de beskrivna haverierna. Kunskapen och förklaringarna grundar sig på systematisk analys av simuleringar, laboratorieexperiment, beräkningar och litteraturstudier.

Elektronik

Först sammanfattas en intervju där olika orsaker till haveri av elektronik framställs. En beskrivning av ett vanligt förekommande nätaggregat följer efter detta. Vidare sammanfattas lagar och standarder som berör ämnet och sist beskrivs laboratorietest av elektronik.

Intervju

Som exempel på hur många haverier som årligen inträffar i Sverige nämns i [1] att 2002 ersattes cirka 22000 skador av försäkringsbolag och av dessa orsakades brand i cirka 5000. Dock innehåller dessa siffror alla skador på elektronik så någon uppdelning av orsak finns inte.

För att få en bild av vad som kan gå sönder och vilka konsekvenser detta kan få intervjuades Getachew Darge som är forskningsingenjör på IEA, institutionen för Industriell Elektroteknik och Automation. Han har mångårig erfarenhet av audio-, video- och datorutrustning.

I intervjun framkom att en orsak till haveri av elektronik är dåliga lödningar som i sin tur ger upphov till varmgång och eventuellt brand. Branden uppstår eftersom de epoxikort som ofta används inte är självsläckande. En annan nackdel med dessa kort är att de lätt går sönder vid fysisk påverkan.

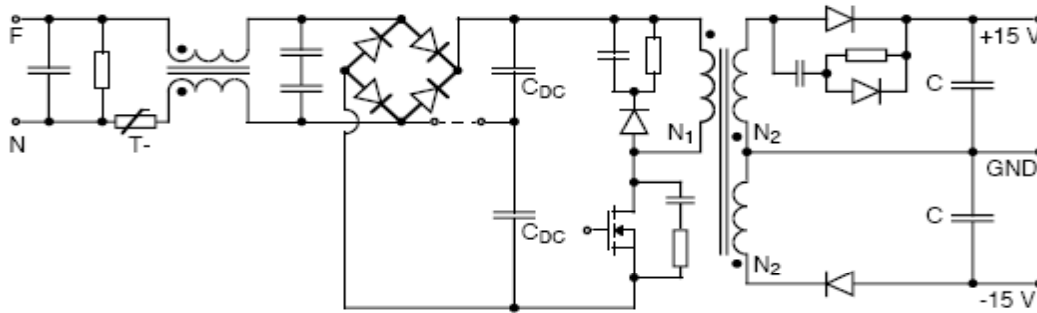
Som en annan orsak nämns att kylningen ofta är undermålig, detta dock framförallt i äldre elektronik (5-10 år). Följden av detta blir att komponenter åldras betydligt snabbare och framförallt nämns att kondensatorerna torkar på grund av värmen och därmed minskar isolationsavståndet vilket kan ge överslag.

Ibland används också fel komponenter som till exempel om säkringen skulle vara supersnabb men endast en snabb används. Följden blir att en för stor ström tillåts flyta i kretsen. I äldre elektronik användes en transformator som kraftaggregat vilket gjorde att strömmarna begränsades till någon ampere. Dagens kraftaggregat som består av switchade transistorer begränsas inte strömmen på samma sätt utan strömmar på tiotal ampere förekommer.

I många hem finns inte jordade uttag där apparaterna kan anslutas, detta kan vara förödande för elektroniken. Om jordningen av apparaten inte är riktigt utförd kommer jordpotentialen att sväva fritt i kretsen vilket kan skapa problem. Då filter ofta avkopplas till jord kommer dess potential att följa störningarnas potential. Allvarligare är dock om kortslutning mot jord inträffar och jorden inte är ansluten.

Beskrivning av ett nätaggregat

En vanlig typ av nätaggregat är uppbyggd enligt flyback-principen. Huvudkretsen hos ett sådant visas i figur 1.



Figur 1. Huvudkretsen för likspänningskonverterare enligt flyback-principen.

Först i kretsen finns ett differentialfilter vars uppgift är att undertrycka störningar med olika riktning, som till exempel transienter i en fas. Efter det första filtret sitter en temperaturberoende resistor som förhindrar för stor strömrusning till kondensatorerna vid spänningssättning. Den tredje komponenten, induktansen, är ett filter som undertrycker störningar med lika tecken och riktning som verkar på båda ledningarna samtidigt. Efter detta filter sitter ytterligare ett differentialfilter och sedan likriktaren som förser kondensatorerna med likspänning. En vanlig storlek på dessa kondensatorer är 250 μF . Efter kondensatorerna sitter transistoren och transformatorn i serie. Över dessa sitter även skyddskretsar, så kallade snubbrar, för att skydda komponenterna mot överspänningar. På transformatorns sekundärsida sitter dioder så att effekten inte matas tillbaka till elnätet. Efter dioderna finns filter för att säkerställa en bra likspänning.

Vid 230 V matningsspänning blir likspänningen efter likriktaren typiskt 320 V. Denna spänning kommer att vara över transistoren när denna är i öppet tillstånd. Till denna spänning adderas även spänning från transformatorns sekundärsida och spänningar över ströminduktanser orsakade av snabb strömdrivata, så att spänningen över transistoren kan bli mycket högre än 320 V. En säkerhetsmarginal på 30 % rekommenderas därför för transistorens tålighet mot överspänning.

Krav på apparaters tålighet mot transienter

Alla apparater som säljs inom EU får inte störa andra apparater samt ska ha en viss tålighet mot störningar. Ett bevis på att detta gäller är att apparaten är CE märkt. I EMC förordningen finns bestämmelserna om vilken tålighet en apparat ska ha mot störningar från omgivningen. Komponenter som till exempel motstånd och kondensatorer omfattas dock inte av förordningen. I EMC förordningen finns dock inga nivåer eller rekommendationer om hur reglerna ska uppfyllas utan dessa finns beskrivna i ett antal standarder.

I Europastandarden EN 61000-4-4 behandlas snabba transienter som har sitt ursprung av till exempel relästudsar och snabba kopplingsförlopp. I Europastandarden EN 61000-4-5 behandlas stötspänningstålighet och långsammare transienter som till exempel uppstår vid kondensatorkopplingar eller vid fel i elnätet. Testnivåer som nämns är spänningar upp till 1 kV för bostäder och lätt industri och 2 kV för industribruk [2]. För närmare beskrivning av kurvformernas utseende hänvisas till beskrivningarna i standarderna.

I den svenska standarden SS 421 18 11 och den internationella SS-EN 50 160 behandlas spänningskvaliteten på elnätet. Skillnaden mellan dessa standarder är att i den svenska gäller endast för lågspänning medan den internationella gäller för spänningar upp till 35 kV [3]. I SS 421 18 11 anges dock inga EMC-nivåer för transienter utan endast typiska värden och härkomst beskrivs. Nivåer som enligt standarden kan tänkas förekomma är av storleksordningen 1.2 kV men nivåer över 800 V är sällsynta. I standarden nämns även långsamma svängningar med överspänning på 70 % orsakad av inkoppling av en större shuntkondensator. Tåligheten hos nätets konstruktionsdelar och tillkopplade bruksföremål förutsätts härklara transienter av storleksordningen 1.5 kV. Jämförelser med denna spänningsnivå görs senare i rapporten.

Skadestånd och ansvar vid transienter i elnätet

I den 2:a och 3:e paragrafen i ellagen finns bestämmelserna kring produktansvar, i vilken skadestånd från nätägare regleras i samband med bristande kvalitet på den levererade elen. 2:a paragrafen lyder:

Om en skada orsakats av säkerhetsbrist i el som satts i omlopp från en elektrisk anläggning med egen generator eller transformator är innehavaren, om inte annat följer av 3:e paragrafen, skyldig att betala skadestånd för personskada samt sakskada på egendom som till typ vanligen är avsedd för enskilt ändamål, om den skadelidande vid tiden för skadan använde egendomen huvudsakligen för sådant ändamål.

Med säkerhetsbrist avses att elen inte är så säker som skäligen kan förväntas.

Vad som menas med säkerhetsbrist nämns i [4] att produktansvaret för el gäller skador till följd av bristande kvalitet på den ström som levererats, ett exempel på bristande kvalitet är spänningstransienter. Vad som är bristande kvalitet beskrivs som nämnts i svensk och europeisk standard. Undantag från skadeståndsskyldighet regleras av 3:e paragrafen, som lyder:

Skadeståndsskyldig enligt 2:a paragrafen är inte den som

1. visar att han inte satt elen i omlopp i en näringsverksamhet.
2. gör sannolikt att säkerhetsbristen inte fanns när han satte elen i omlopp.
3. visar att säkerhetsbristen beror på att elen måste stämma överens med tvingande föreskrifter som meddelats av en myndighet, eller
4. visar att på grundval av det vetenskapliga och tekniska vetandet vid den tidpunkt då han satte elen i omlopp inte var möjligt att upptäcka säkerhetsbristen.

Vid bestämmande av ersättning för skada tillämpas skadeståndslagen. När ersättning enligt produktansvar yrkas finns det dock en självrisk om 3500 kr.

Till försäkringsbolaget Folksam ställdes frågan om ersättningsförfarandet vid havererad elektronik på grund av transienter i elnätet. Sammanfattat blev svaret att ersättning lämnas vid fel i elektronik eller apparater orsakat av transienter,

kortslutning och överspänning orsakade av någon känd eller okänd händelse i elnätet. Om dock elleverantören har ansvar för att ha orsakat skadorna hänvisas kunden till denna [5].

Laboratorietest av elektronik

I laboratoriet utfördes några enkla tester på en datorskärm för att undersöka om denna tålde de överspänningar som uppkom då strömmen genom en induktans bröts. Kretsen var densamma som i figur 36. Skärmen inkopplades efter den extra induktansen, det vill säga samma inkoppling som voltmetern. Elektroniken utsattes därefter för fem prov där spänningen var i intervallet 1,2-1,5 kV med en periodtid på cirka 0,1 ms. Resultatet blev endast att den startade om vid testerna på grund av spänningsfallet i samband med kortslutningsströmmen och inga fel i elektroniken kunde påvisas.

Litteratursökning

När ingen last är tillkopplad på ledningen som spänningssätts så ger ledningens kapacitans och induktans upphov till oscillation. Beroende på förimpedans och ledningsimpedans blir amplituden och frekvensen på oscillationen olika. Amplituden på spänningen kan bli så stor som $2\sqrt{2} V_{\text{Max}}^{*1}$ på grund av reflektion vid den öppna änden av ledningen. I ett 0,4 kV nät blir spänningen till jord i den öppna änden av kabeln som mest 0,65 kV under cirka 10 μs om spänningen färdas nära ljusets hastighet i 1 km lång kabel. Detta är dock inget stort problem vid låga spänningar utan det är främst vid höga spänningar detta kan orsaka överslag genom apparater [6] [7].

Om det finns laddning kvar på ledningen när denna spänningssätts blir det en överspänning^{*1} som beror på skillnaden i potential mellan kabeln och matande nät.

Vid spänningssättning av transformatorer flyter en icke sinusformad magnetiseringsström som kan ha en amplitud som är flera gånger den normala driftströmmen. Denna ström kan ge upphov till en icke sinusformad överspänning^{*1}.

Om brytarekontaktarna öppnas då strömmen är nära noll kommer det att finnas en spänning över dessa eftersom strömmen och spänningen inte är i fas. Det kan då uppstå överslag mellan kontaktarna om spänningen blir för stor i förhållande till avståndet. Denna ström består av en del som oscillerar mellan kapacitansen och induktansen i elnätet och en del som består av den återvändande strömmen till lasten och felet. Den totala strömmen genom brytaren är noll varje gång dessa strömmar tar ut varandra och vid varje sådant tillfälle kan brytaren bryta strömmen. Strömmen genom induktansen i kretsen som bryts bort behöver dock ej vara noll, detta betyder att det kommer att finnas energi kvar i kretsen som kan ge upphov till överspänning^{*1}. Om flera överslag sker kan överspänningen bli väsentlig.

Då en transformator endast har en fas ansluten, till exempel om två säkringar gått sönder eller alla tre kontaktarna inte bryter samtidigt, kan ferroresonans uppstå. Detta genom att strömmen får en passage via lindningarna genom kapacitansen till jord i den matande kabeln. Spänningens ögonblicksvärde över de lindningar som ej är spänningssatta kan bli stor. Detta fenomen kan uppstå alla kretsar där seriekopplad kapacitans och induktans existerar. Spänningen^{*1} över kretsen är summan av spänningarna över induktansen och kapacitansen och ges av

$$V = V_L + V_C = j\omega LI - j\frac{I}{\omega C} \quad (1)$$

alltså ges spänningen över induktansen av

$$V_L = V + j\frac{I}{\omega C}$$

Fotnot: ^{*1} Ögonblicksvärdet av den maximala spänningen mellan fas och jord.

Om den kapacitiva reaktansen och den induktiva reaktansen är lika stora kommer impedansen att vara noll och strömmen därmed att vara stor. I (1) syns då att spänningen över induktansen blir direkt proportionell med strömmen.

Vid brytning av induktiv ström kan spänningen*¹ bli väldigt stor över de induktanser som finns i elnätet.

Vid enfasigt fel i ett ojordat system flyttas jordpotentialen så att spänningens rms värde mellan de friska faserna och jord kan bli $\sqrt{3}$ gånger större än normal fasspänning.

Vid spänningssättning av kondensatorer oscillerar spänning*¹ och ström mellan induktansen och kapacitansen i kretsen. Spänningen kan bli upp till den dubbla vid en frekvens som bestäms av induktansens och kapacitansens värde.

Simulering

För att få förståelse om hur olika komponenter och händelser påverkar utseendet på spänningen och strömmen i ett elektriskt kraftnät utfördes simuleringar. Först följer en beskrivning av ett fiktivt elnät där spänningskurvans utseende undersöks vid olika händelser och komponentvärden. Vidare beskrivs uppbyggnaden av en simuleringsmodell av en säkring och i den sista delen används denna modell för att studera vilka spänningar som kan uppstå vid brytning av induktiv ström.

Om simuleringsverktyget

Simuleringsprogrammet som används är PSCAD/EMTDC där PSCAD är det grafiska gränssnittet och EMTDC är transientsimulatoren som utför beräkningarna av elektromagnetiska transienter i tidsdomänen. EMTDC har utvecklats sedan mitten av 1970-talet. Inspirationen kommer ursprungligen från en publikation i IEEE Transactions of Power Apparatus and Systems, 1969 av Dr. Hermann Dommel.

Systemet som ska simuleras byggs upp av grafiska symboler av till exempel;

- Passiva och aktiva element
- Transformatorer
- Ledningar
- Brytare
- Strömkällor och spänningskällor
- Analoga och digitala funktioner
- Mätinstrument

Simuleringar som kan utföras är till exempel;

- AC system innehållande generatorer, transformatorer, ledningar m.m.
- Reläkoordination
- Mätning av transformatorer
- Subsynchron resonans i system med maskiner och ledningar
- För isolationskoordinering för överspänningar vid åska, fel m.m.

Simulering av ett fiktivt elnät

I figur 2 visas kretsens kopplingsschema. Typiska värden på transformatorernas parametrar finns i appendix A. Kabel 1 i figuren är en T-modell av en 1 km lång och kabel 2 en 100 m lång 150 mm² kabel. Ett mått på hur stort felet blir när en kabels kontinuerliga parametrar görs om till diskreta modeller av typ T eller Π nämns i [6]. Om ledningslängden är kort jämfört med en kvarts våglängd så blir felet litet, vid en mil ledning betyder detta att frekvenser mindre än cirka 100 kHz kan simuleras med hyfsad noggrannhet, om ljusets hastighet antas. I simuleringen är ledningslängderna max några kilometer och därför är en T-modell en bra approximation.

Spänningsnivåerna i figuren är 130 kV till vänster om transformator 1, 11 kV mellan transformatorerna och 0,4 kV till höger om transformator 2. Effekten i last 1 är cirka 5 MVA och i last 2 cirka 7 MVA. Detta motsvarar 14 % av märklaster på transformator 1.

Den reaktiva effekt som kondensator 1 kan leverera är 3,4 MVar, alltså kompenseras nästan hela den induktiva lasten på 3,9 MVar.

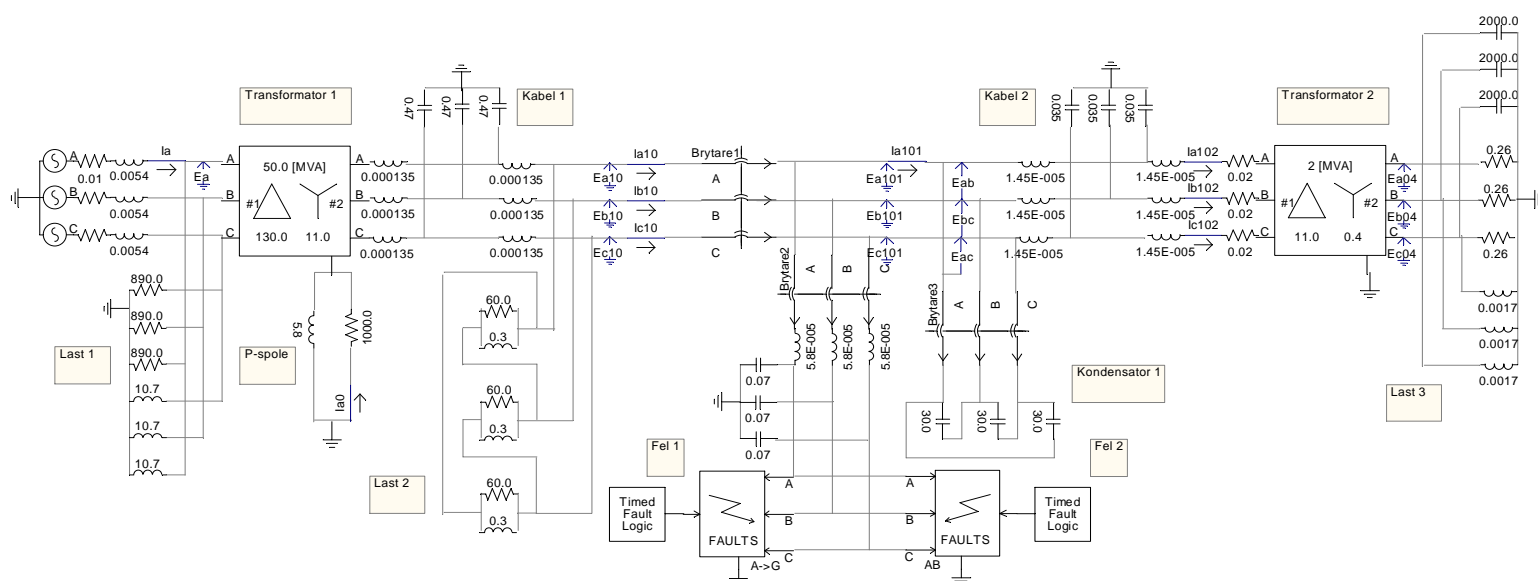
Spolen i nollpunkten på transformator 1 kompenserar för den kapacitiva ström som uppstår vid enpoligt jordfel så att strömmen blir noll i felstället så att en eventuell ljusbåge inte kan fortgå utan självslocknar. Spolens induktans och nätets kapacitans bildar en parallell krets som har impedansen

$$Z = X_L \parallel X_C = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC}$$

om spolens induktans väljs till

$$L = \frac{1}{\omega^2 C}$$

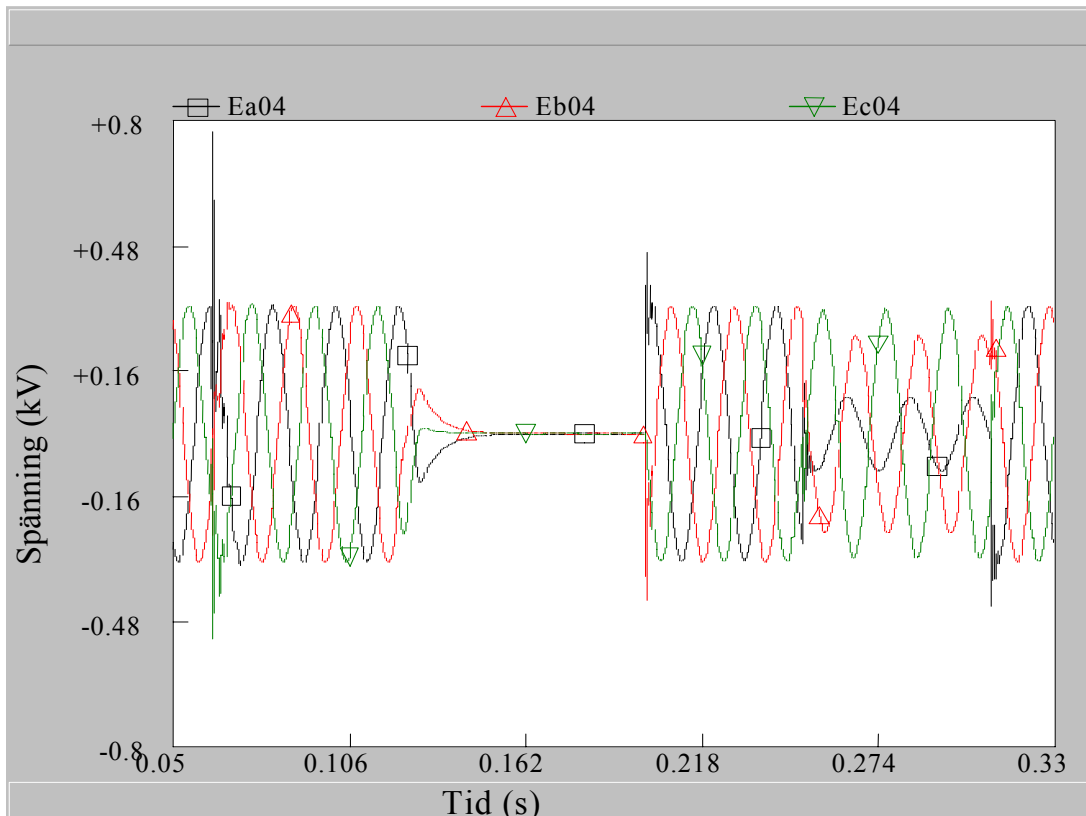
kommer impedansen att vara oändlig och ingen ström kommer att flyta. För att kunna upptäcka jordfel kan en resistans parallellkopplas med spolen så en aktiv ström om cirka 5-20 A tillåts normalt att flyta i kretsen som därmed bildar en mätbar spänning som indikerar jordfel [8].



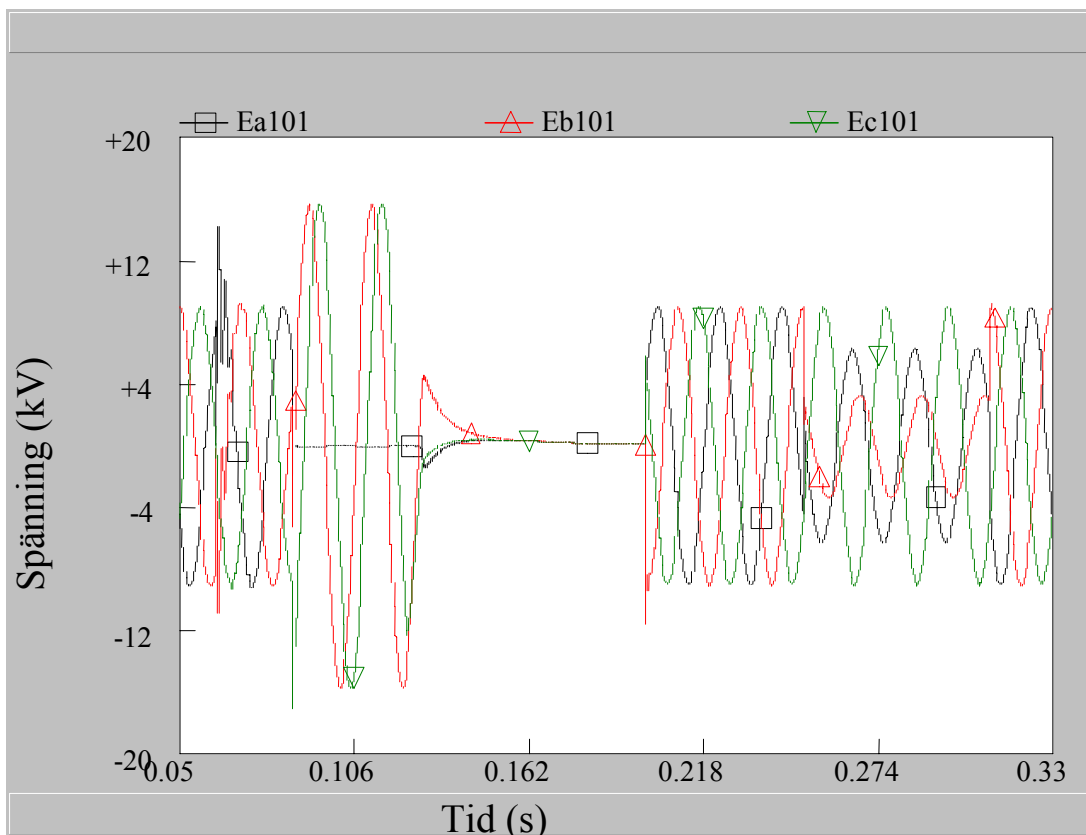
Figur 2. Kopplingsschema över den simulerade kretsen.

Händelserna i kretsen är att vid tiden 62 ms spänningssätts kondensator 1 via brytare 3, vid tiden 86 ms inträffar ett jordfel via fel 1. Detta fel bryts bort vid tiden 126 ms av brytare 1 och vid tiden 200 ms spänningssätts kretsen igen av brytare 1 efter det att felet försvunnit. Efter detta sker vid tiden 260 ms en kortslutning mellan fas A och B genom fel 2. Detta fel bryts bort av brytare 2 vid tiden 310 ms.

I figur 3 visas spänningen på nedsidan av transformator 2 under hela simuleringen och i figur 4 visas spänningen på dess uppsida.



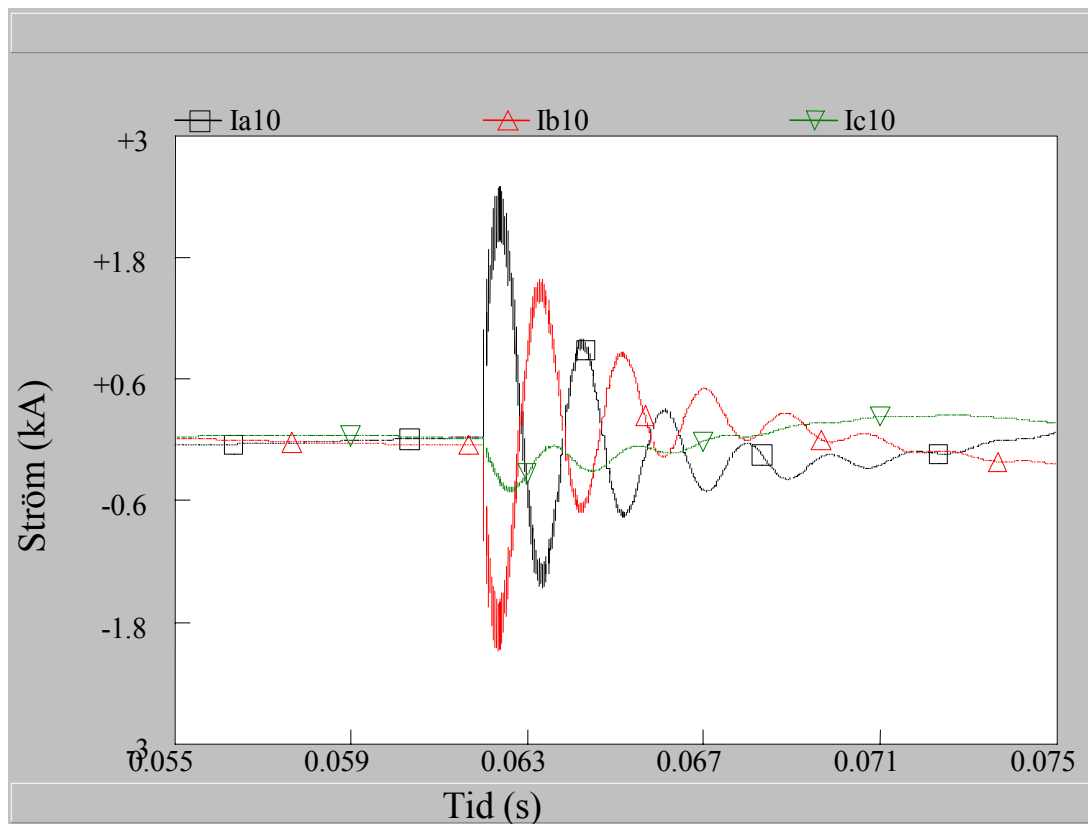
Figur 3. Spänningen i 0,4 kV nätet.



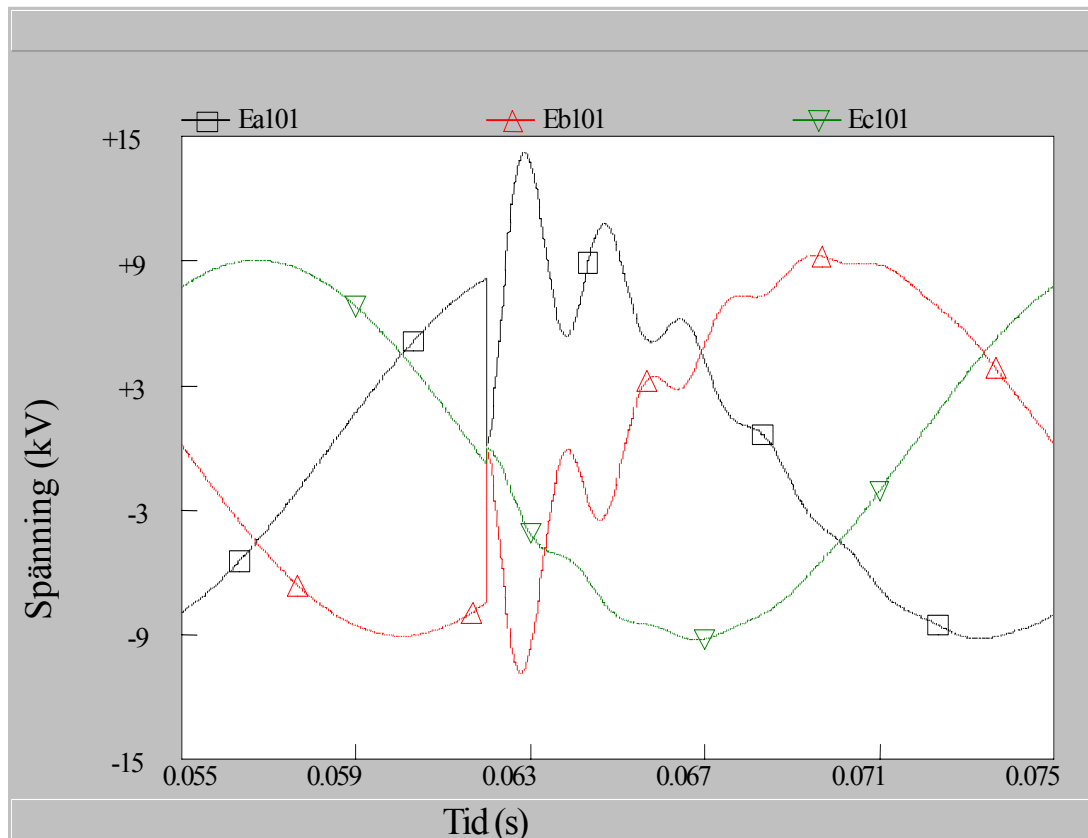
Figur 4. Spänningen i 11 kV nätet.

Inkoppling av kondensator

I figur 5 visas strömmen och i figur 6 visas spänningen då kondensator 1 kopplas in.



Figur 5. Strömmen vid inkoppling av kondensator 1.



Figur 6. Spänningen vid inkoppling av kondensator 1.

I figur 5 finns ett antal olika oscillationsfrekvenser. Den lägsta frekvensen är på 540 Hz och är oscillation mellan kondensator 1 och främst induktansen transformator 1. Induktansen i kretsen kan beräknas till

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} = 3mH$$

induktansen i transformator 1 kan beräknas till

$$L = X_K \frac{V^2}{S} = 0,08 \frac{(11kV)^2}{50MVA} = 2mH$$

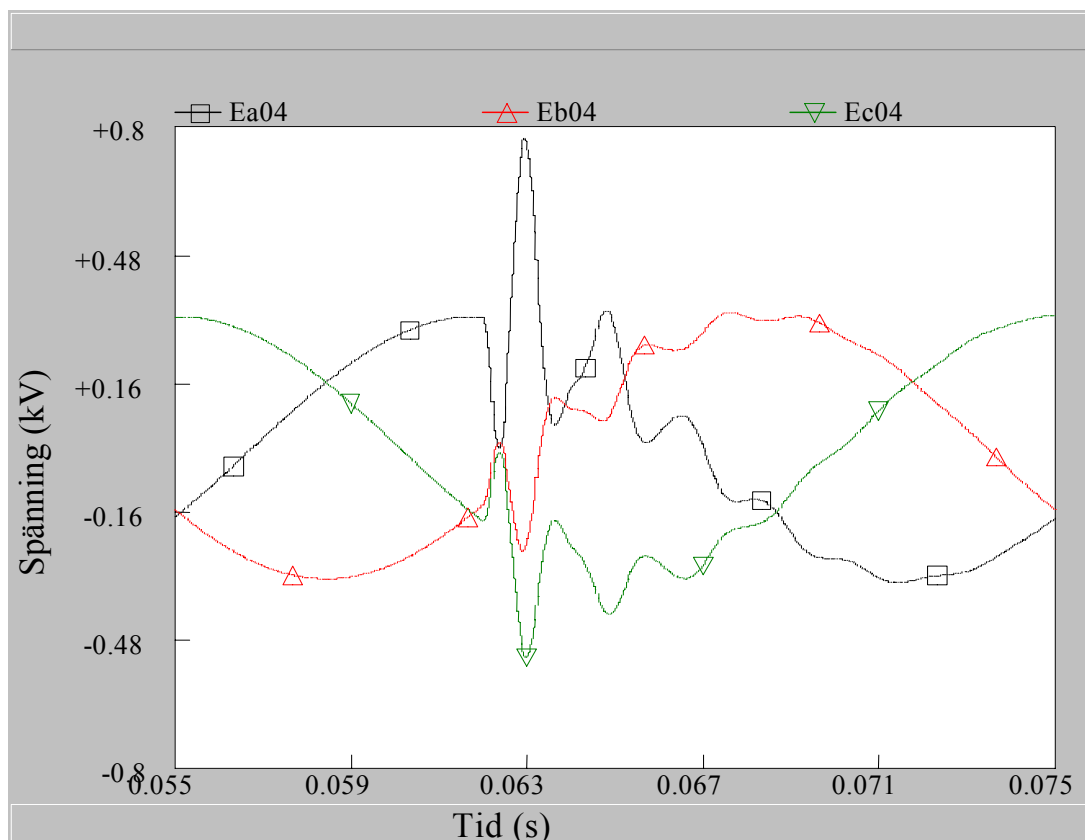
vilket tyder på att den största oscillationen sker mellan transformatorn och kondensatorn.

I figur 6 syns att spänningen blir noll i tillslaget, som en kortslutning, och att den oscillerar lika mycket över normal spänningsnivå som den startade under, alltså blir överspänningen* som mest 100 %. Detta beror på att strömmen genom induktansen inte kan ändras momentant utan fortsätter att öka ända tills spänningen över kondensatorn blir större än nätets spänning. När detta inträffar blir strömderivatan negativ och strömmen minskar till noll efter en kvarts period. När strömmen är noll så är spänningen maximal och dess derivata ändrar tecken och därför kommer strömmen, eftersom

$$I = C \frac{dV}{dt},$$

också ändra tecken och därmed förflytta laddning från kondensatorn. Om ingen resistans finns i kretsen kommer denna oscillation att fortgå.

I figur 7 visas spänningen på nedsidan av transformator 2 vid inkopplingen av kondensatorn.



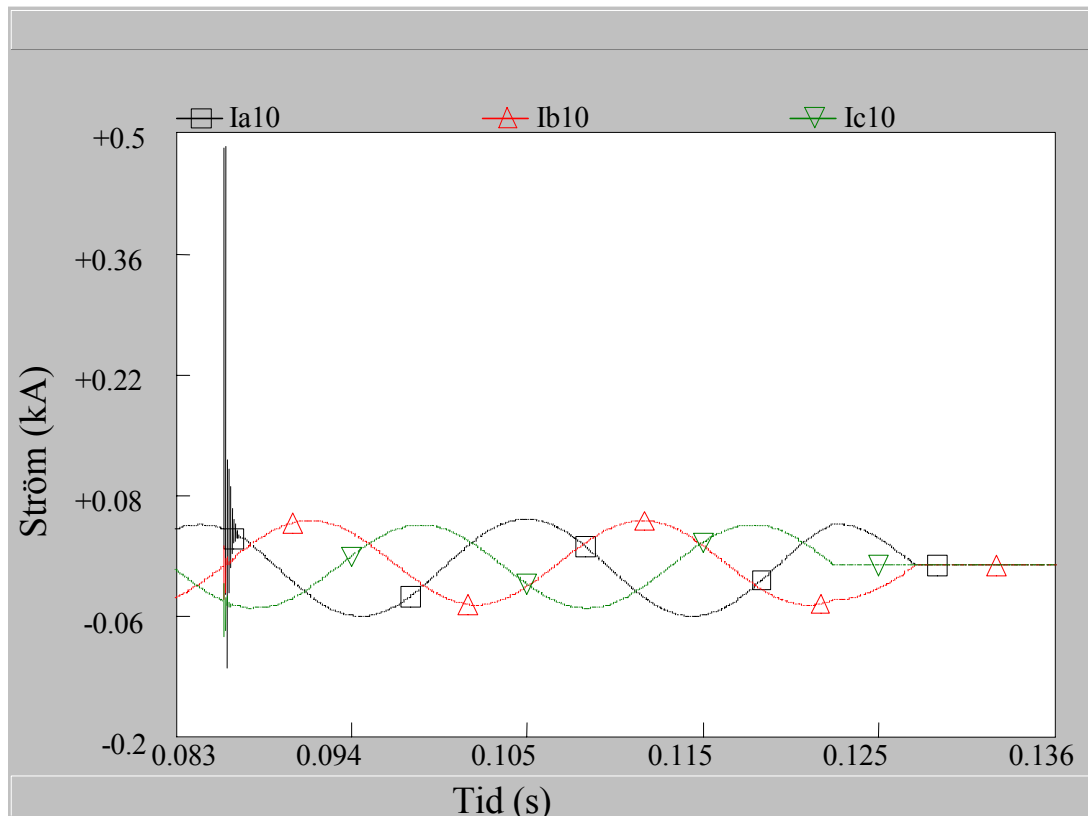
Figur 7. Spänningen på nedsidan av transformator 2.

I figuren syns att spänningen oscillerar till en nivå som är mer än dubbla spänningen. Detta beror på att oscillationen på uppsidan av transformatorn adderar spänning till oscillationen på nedsidan av transformatorn. Som mest blir spänningen 772 V vilket är en överspänning på 130 %^{*2}. När kapacitansen togs bort i lasten på nedsidan av transformator 2 blev överspänningen endast 60 %.

Jordfel

I figur 8 visas strömmen i kretsen under jordfelets varaktighet.

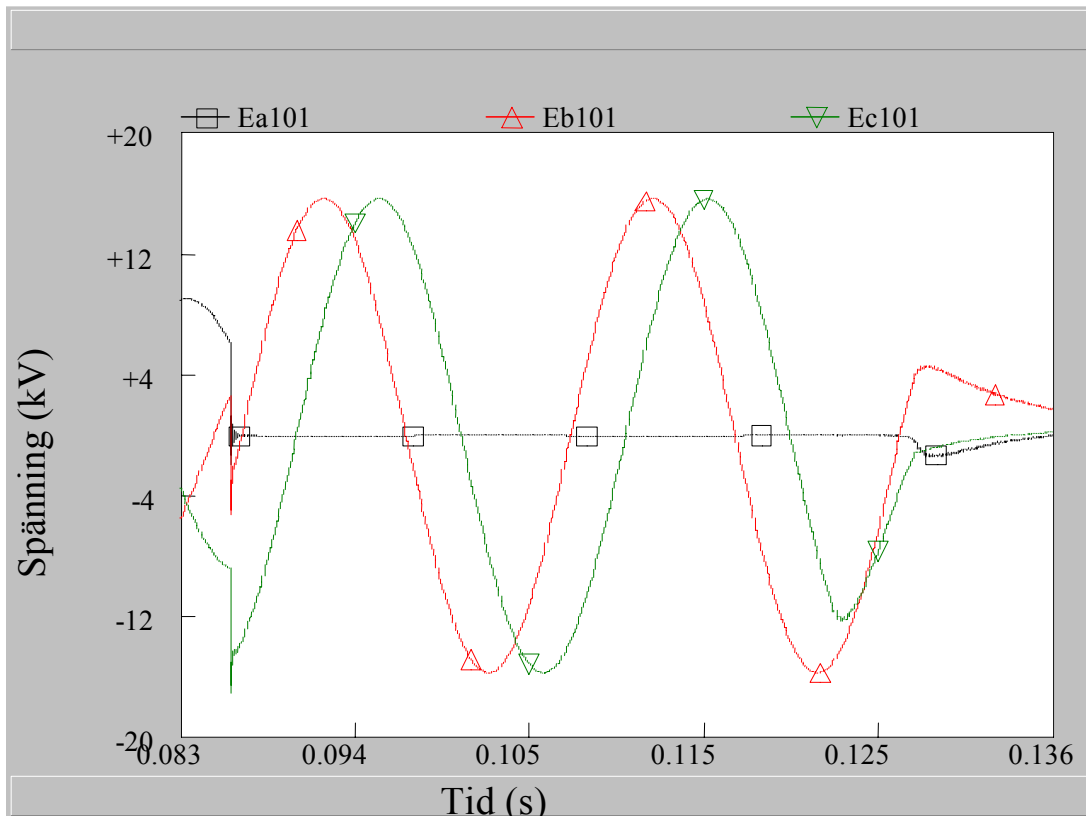
Fotnot: ^{*2} Alla procentuella spänningsjämförelser är den överstigande spänningen mätt från normalt maximala ögonblicksvärdet mellan fas och jord, cirka 325 V i 230/400 V system.



Figur 8. Strömmen vid simulering av jordfel.

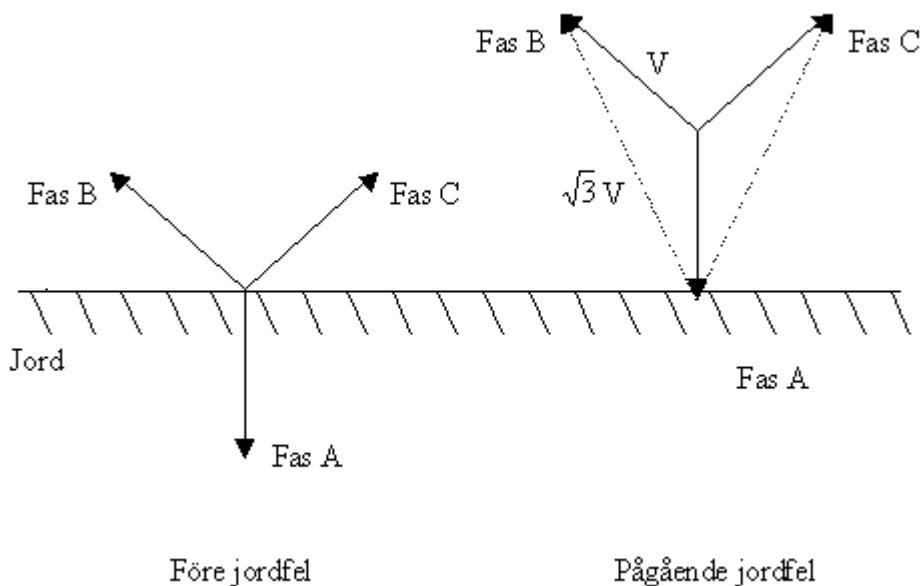
Strömtoppen vid felets initiering, vid tiden 86 ms, kommer av att den skadade fasens laddning i dess kapacitans till jord förflyttas så potentialen över denna blir noll. Eftersom brytaren ej kan avbryta strömmen utan väntar till närmaste nollgenomgång så bryts inte alla faserna samtidigt, detta syns vid tiden 125 ms.

I figur 9 visas spänningen i det matande nätet



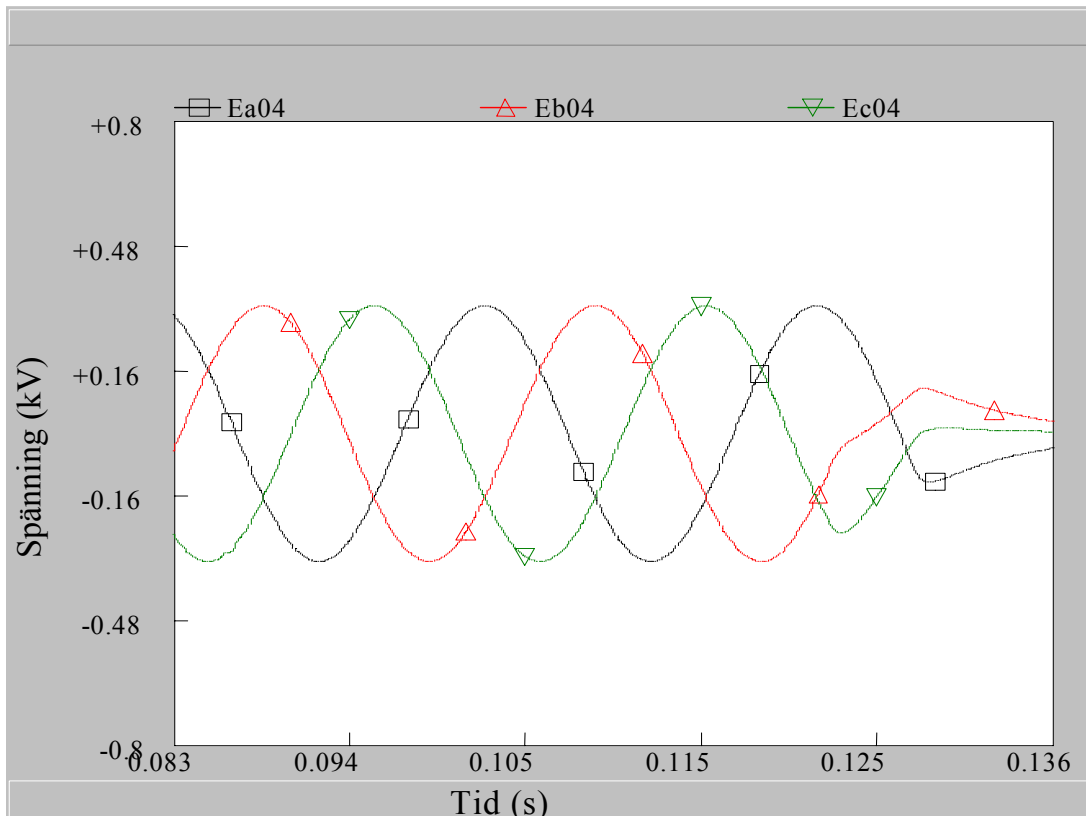
Figur 9. Spänningen på uppsidan av transformator 2.

I figur 9 syns att spänningen i det matande nätets felfria faser höjs med en faktor $\sqrt{3}$ i förhållande till jord under felets varaktighet. Detta beror på att jordpotentialen varierar med den jordade fasen A, se även figur 10.



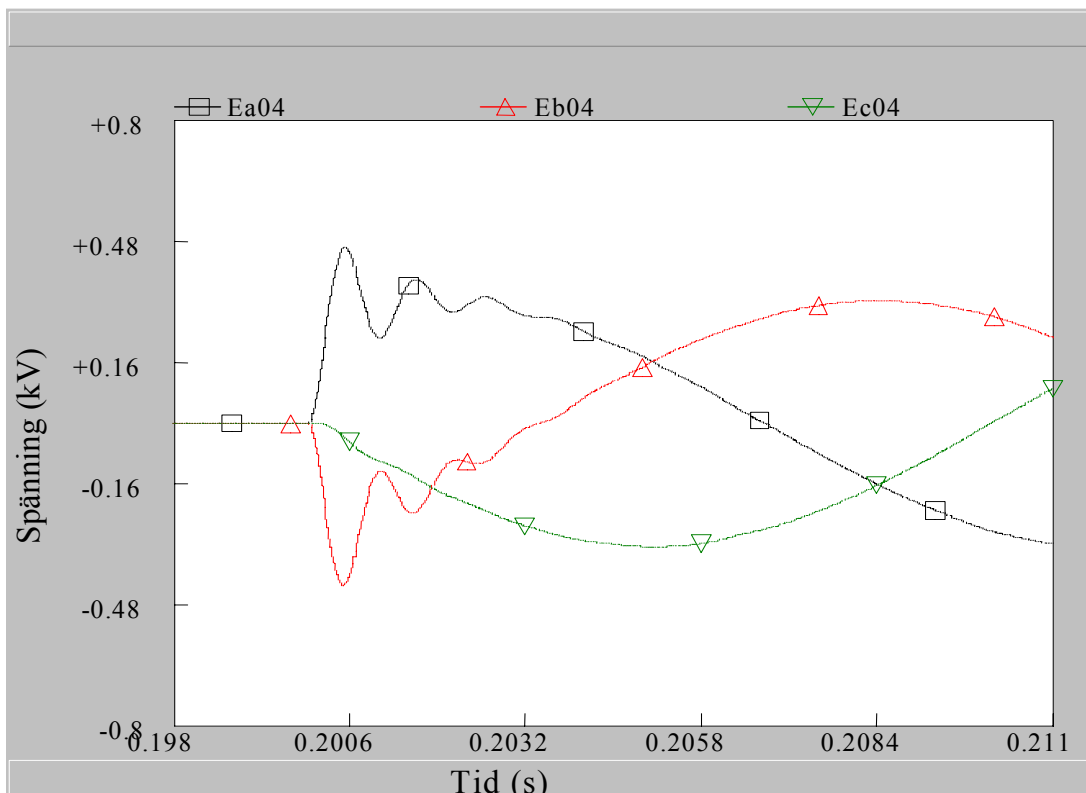
Figur 10. Spänningsvektorerna före och under pågående jordfel.

I figur 11 visas spänningen på nedsidan av transformator 2.



Figur 11. Spänningen på nedsidan av transformator 2.

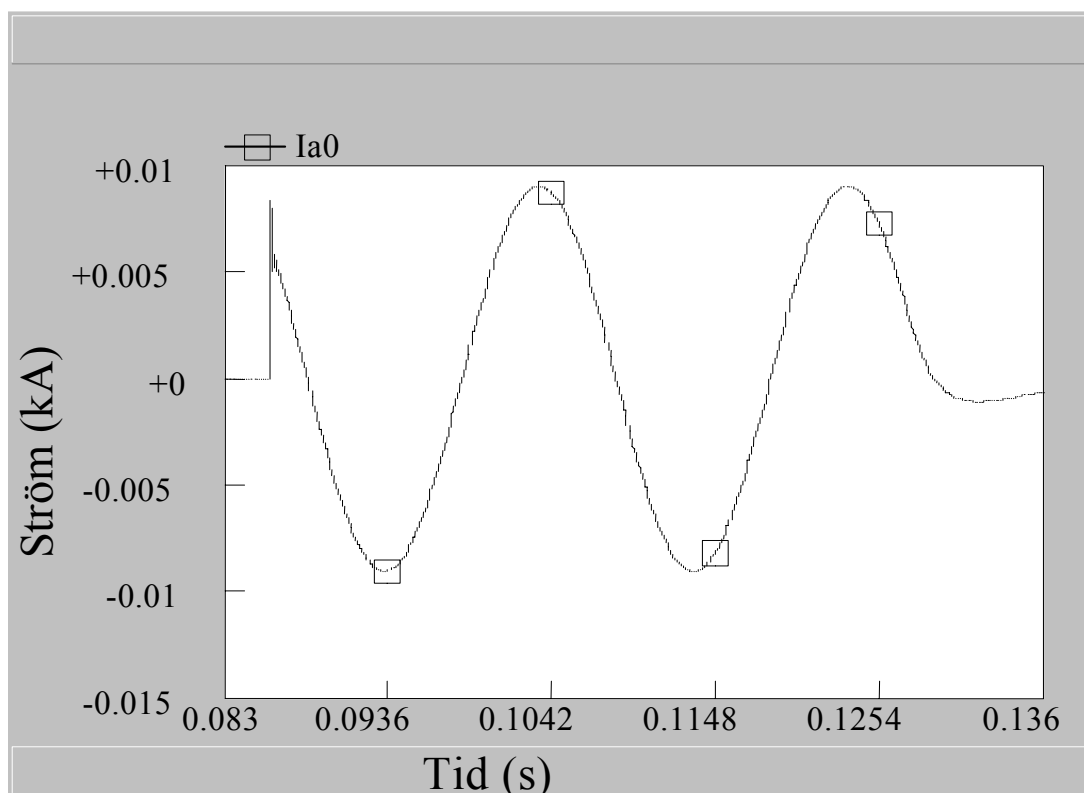
Spänningen på nedsidan av transformator 2 förblir normal under jordfelets varaktighet eftersom spänningen mellan faserna är densamma och transformatorn är delta kopplad.



Figur 12. Spänningen på nedsidan av transformator 2.

Vid tillkopplingen efter felet oscillerade spänningen på grund av kapacitansen i lasten, som mest blev överspänningen 40 %. I detta fallet blir spänningen inte så stor som när kondensatorbatteriet spänningssattes, figur 7. Detta beror på att när hela anläggningen spänningssätts motverkar induktansen i nätet strömmen så att förändringen inte blir så snabb och därmed dämpas oscillationen något. När kapacitansen togs bort uppträdde ingen oscillation eller överspänning.

I figur 13 visas strömmen genom transformatorns nollpunkt under pågående jordfel.

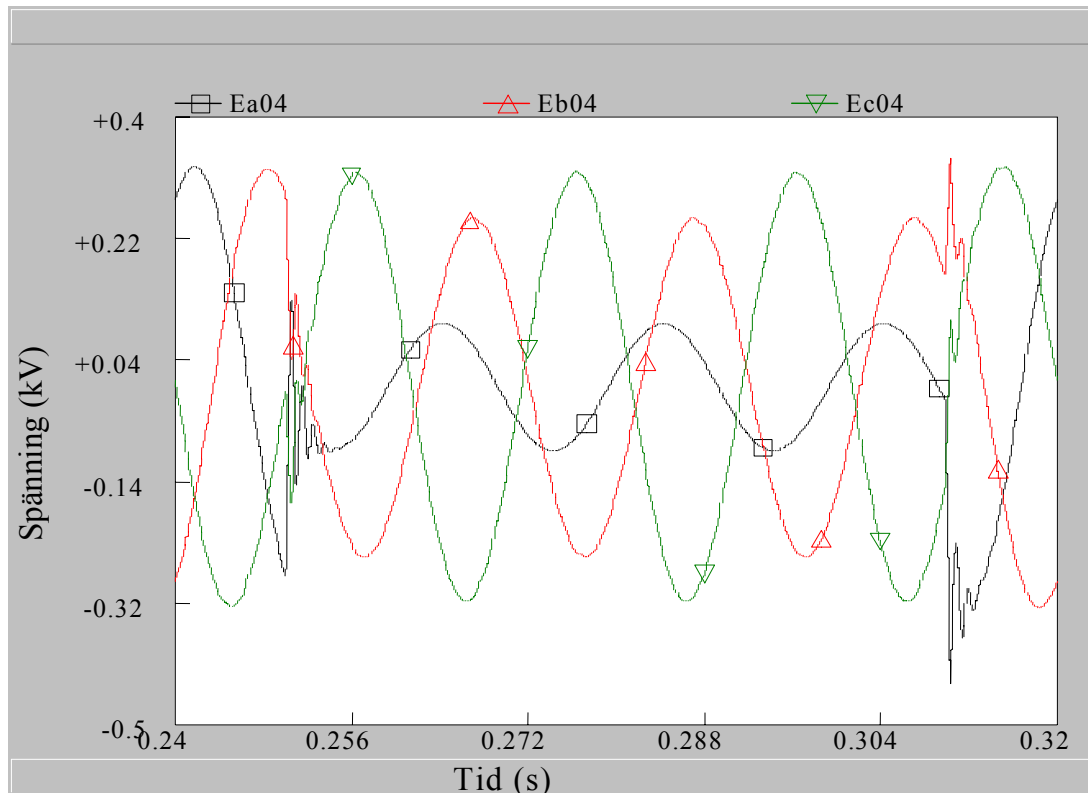


Figur 13. Felströmmen genom nollpunkten på transformator 1.

I figuren syns att jordfelströmmen endast är 5 A under jordfelet.

Kortslutning

I figur 14 visas spänningen på nedsidan av transformator 2 under kortslutningens varaktighet..



Figur 14. Spänningen under kortslutningen.

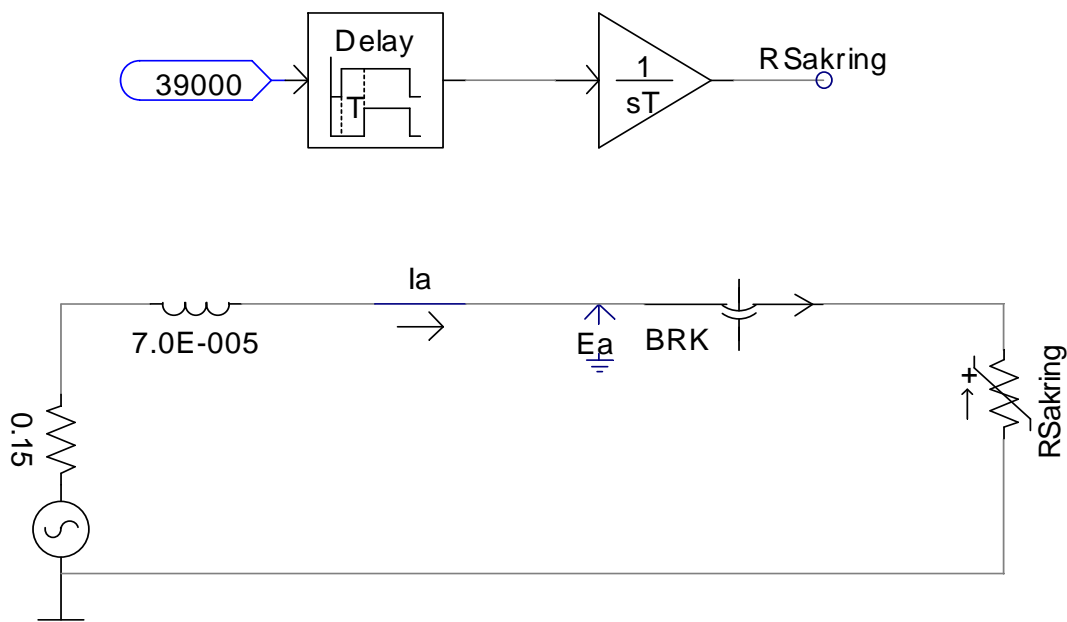
Överspänningen vid tillslaget beror på oscillation mellan kondensatorerna på nedsidan av transformator 2 och induktansen i lasten och transformatorn.

Diskussion Om simuleringarna

Simuleringarna har gett viss förståelse om vilka komponenter och parametrar som påverkar spänningens och strömmens utseende i kretsen. Induktansen men framförallt kapacitansen i kretsen verkar ha stor inverkan på om det blir några transienter medan resistansen inte påverkar transienters begynnelsevärde utan har en dämpande effekt över tiden. Spänningsnivåer på upp till toppvärdet 0,6 kV kan enligt simuleringarna förväntas förekomma i elnätet.

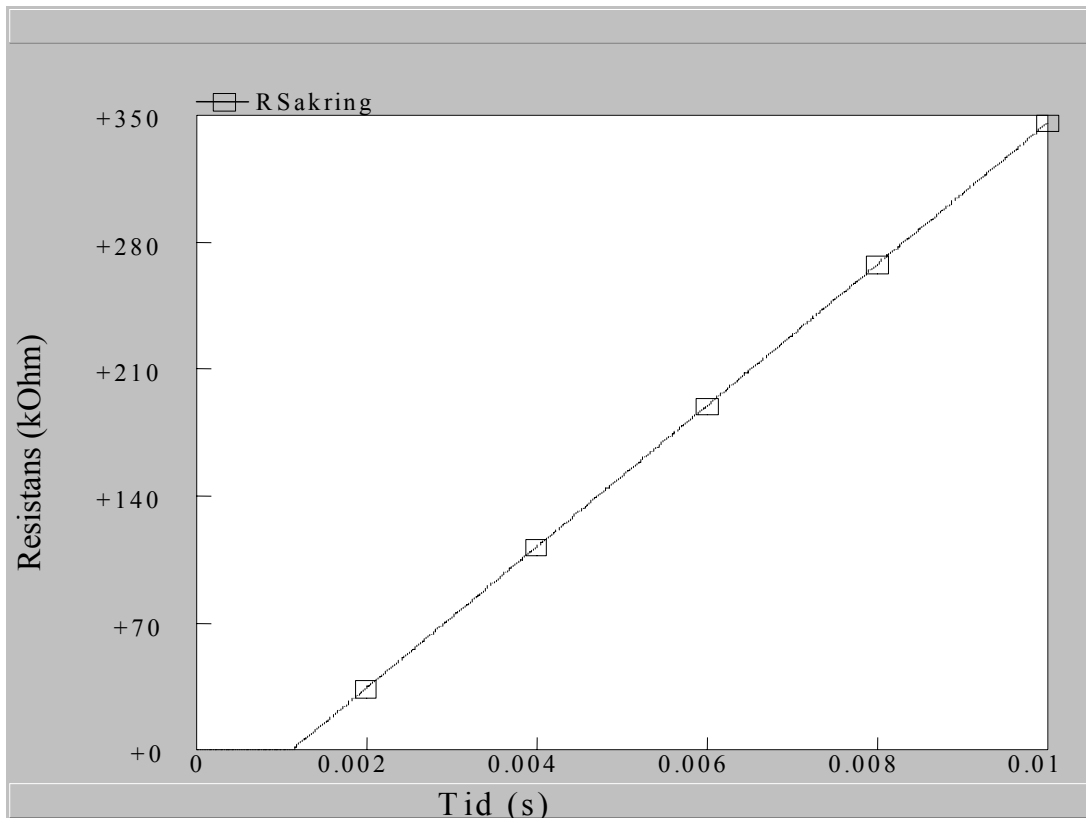
Simulering av säkring

Med hjälp av de uppmätta resultat av en säkring som smälter som presenteras i kapitlet *Kortslutningsprov* konstruerades en simuleringsmodell av en säkring som går sönder. Detta gjordes för att kunna simulera en sådan händelse i modellen av ett elnät för att undersöka de transienter som uppstår då en säkring smälter. I figur 15 visas simuleringsmodellen.



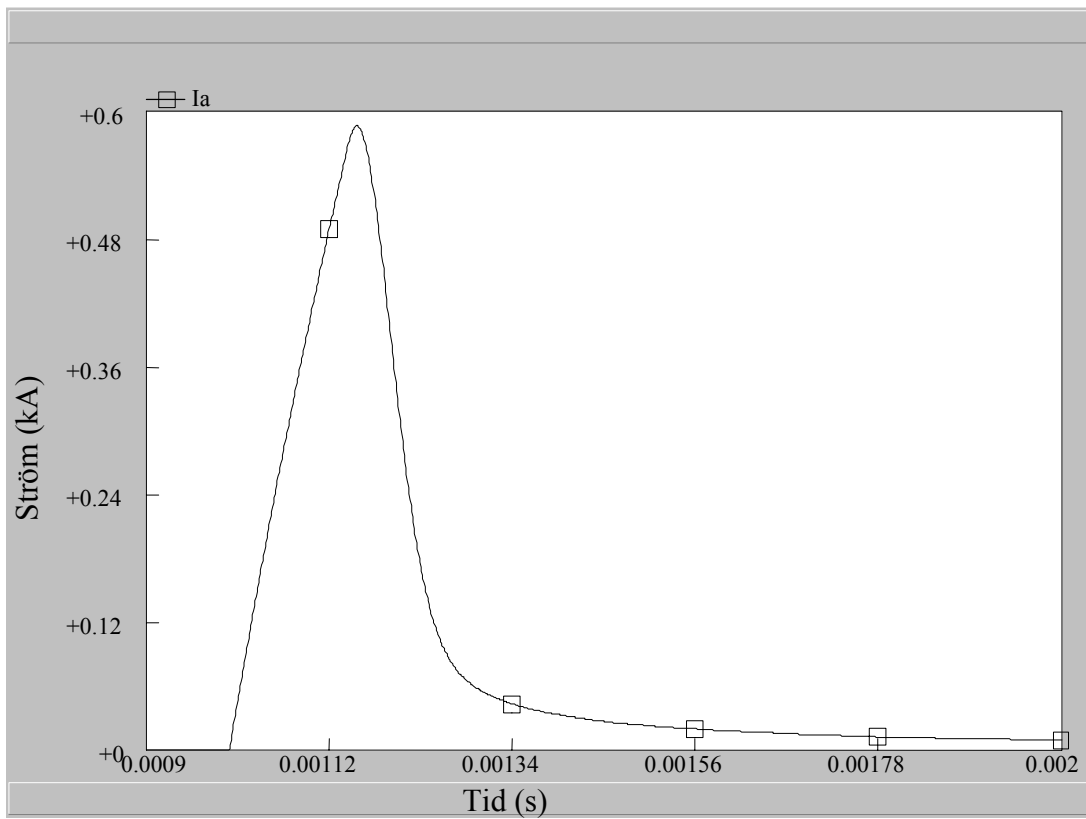
Figur 15. Simuleringsmodell av säkring.

Modellen är väldigt enkel då den endast bygger på att resistansen ökar linjärt då det ledande materialet i säkringen smält och ljusbågen tänds. Resistansen under simuleringen visas i figur 16.



Figur 16. Resistansen under simuleringen.

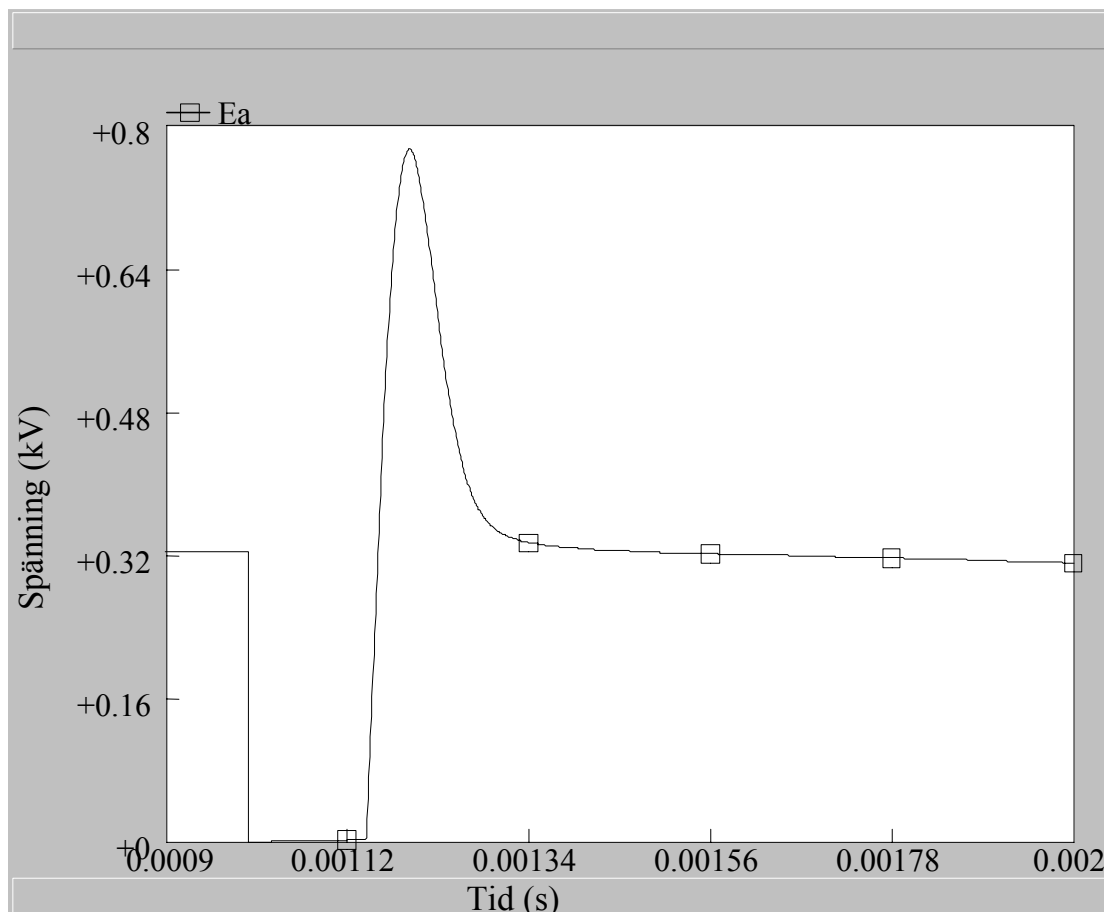
I figur 17 visas strömmen genom säkringen vid simuleringen.



Figur 17. Strömmen vid simulering av säkring.

Strömmens stigtid regleras i simuleringen med hjälp av induktansen i kretsen och falltiden dels med induktansen men även genom hur stor resistansökningen i säkringen var.

I figur 18 visas spänningen under simuleringen.



Figur 18. Spänningen vid simulering av säkring.

När en resistiv last om 5,3 kW anslöts parallellt med säkringen minskade amplituden på överspänningen från 150 % till 120 % och vid ansluten last om 53 kW blev överspänningen 40 %*². Detta stämmer bra med övriga simuleringar som också visar att inkopplad last har en dämpande effekt på överspänningen.

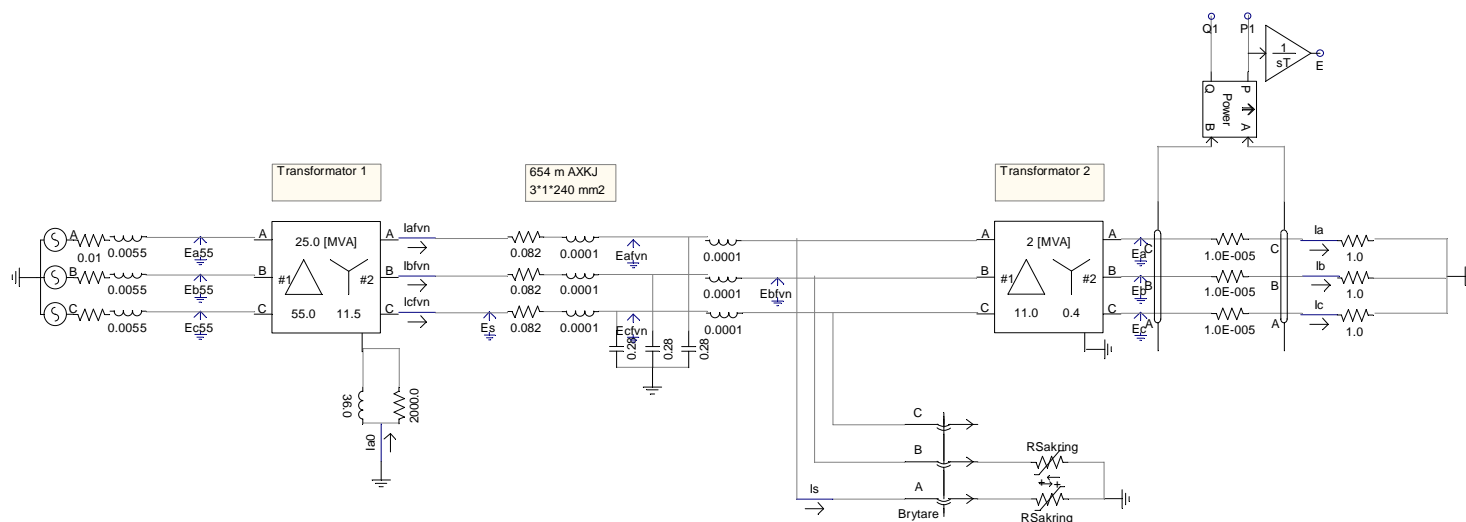
I säkringar blir efter en viss ström den genomsläppta energin konstant, detta sker för en 6 A säkring vid en ström på cirka 80 A. Alltså blir

$$I^2 t = \int_0^t i^2 dt$$

konstant och proportionell mot denna energi. Genom att hålla $I^2 t$ värdet konstant i simuleringen och variera induktansen i kretsen undersöktes hur överspänningen varierar med induktansen. Vid en ökning av induktansen med 10 % så ökade överspänningen med 4 % trots att kortslutningsströmmen och dess derivata minskade. Detta kan jämföras med laborationsförsöken som också visade att överspänningen ökar med ökad induktans.

Simulering av brytning av induktiv ström

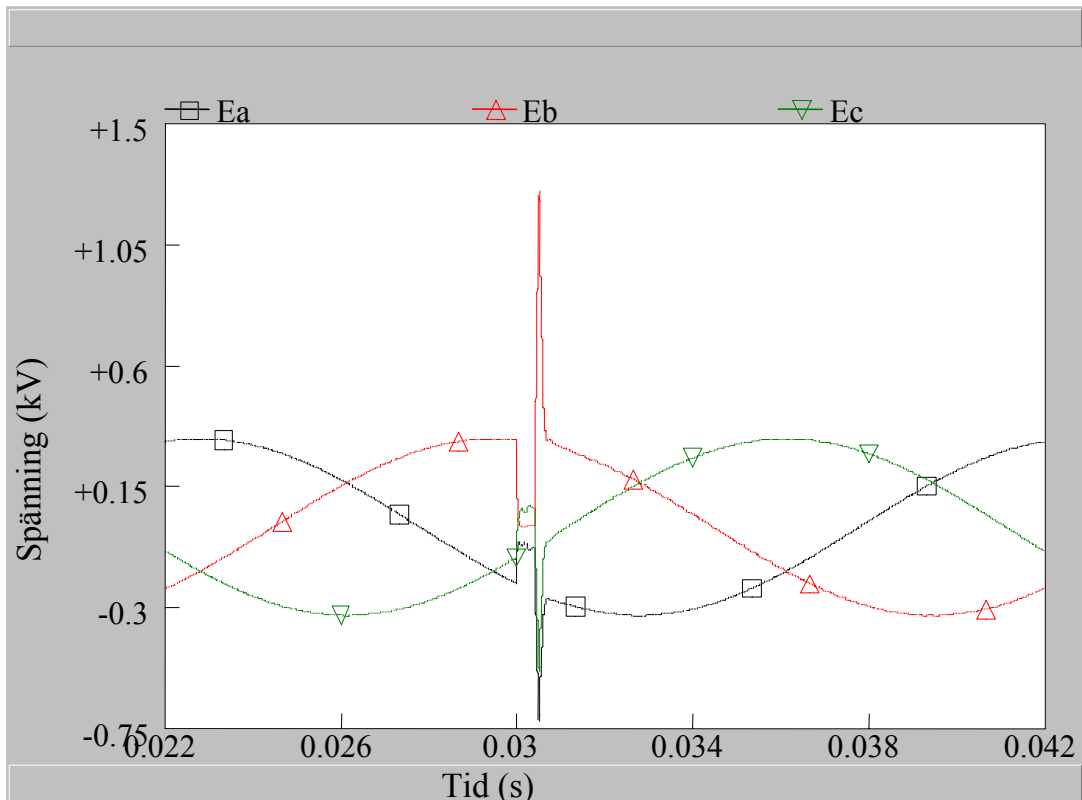
I denna simulering undersöktes vilka överspänningar och energier som kan uppstå om en induktiv ström bryts av till exempel en säkring. Simuleringsmodellen visas i figur 19 nedan.



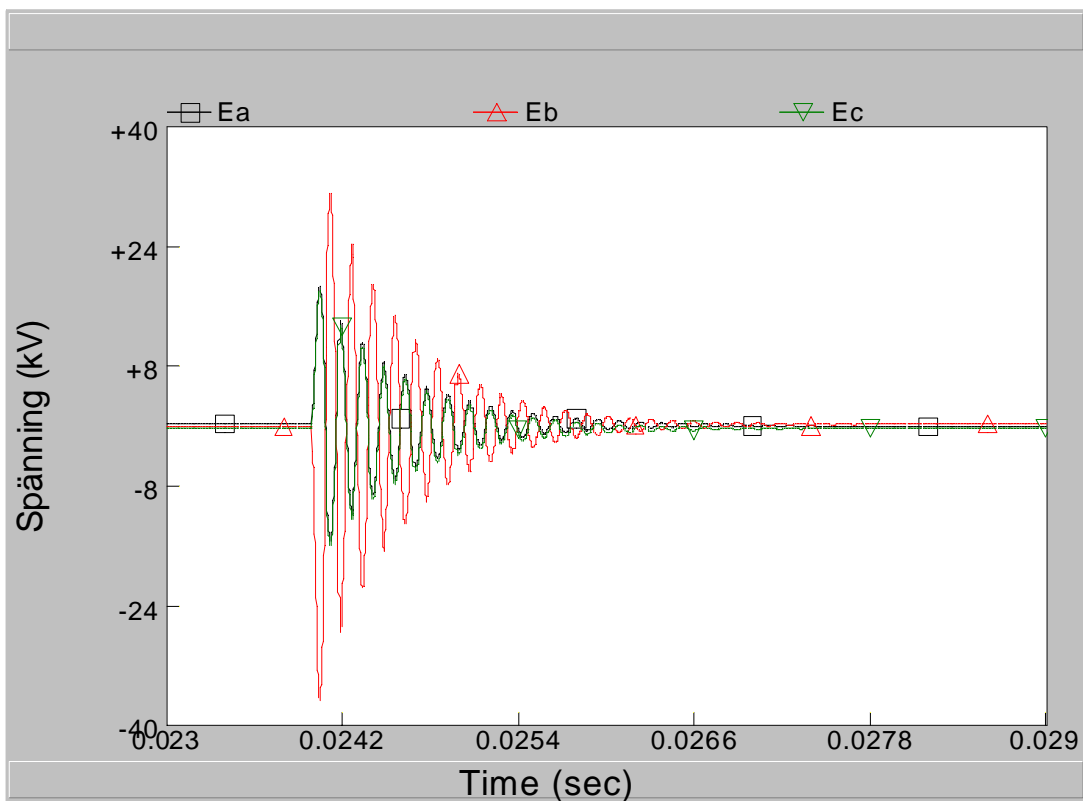
Figur 19. Simuleringsmodellen.

Spänningarna är från vänster 55 kV, 11 kV och 0,4 kV i figuren. För att få en uppfattning om hur mycket energi som transporterades till lasten mättes denna i simuleringen.

I figur 20 visas spänningen på nedsidan av transformator 2 vid brytning av en ström på 1,5 kA med derivatan 9 MA/s och lastresistansen 1 Ω och i figur 21 visas spänningen då strömmen bryts momentant.



Figur 20. Spänningen på nedsidan av transformator 2.



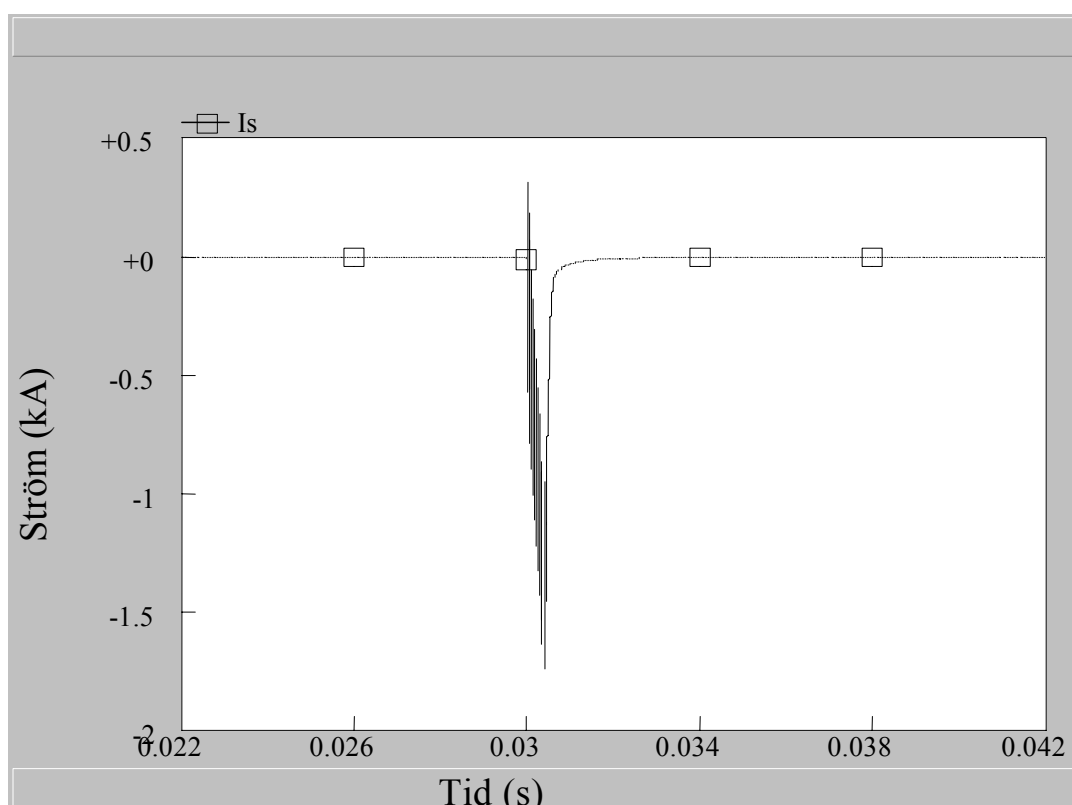
Figur 21. Spänningen på nedsidan av transformator 2.

I figurerna visas strömmen vid olika derivator på strömmen. Genom att simulera extremfallet oändlig derivata undersöktes hur stor den maximala spänningen kunde

bli, se figur 21. Det är dock inte troligt att strömmen kan brytas oändligt snabbt men det visar att stora spänningar kan uppstå om ström avbryts snabbt.

Om resistansen i kretsen är stor blir spänningen stor över induktansen så att en ström kan flyta och därmed transportera bort energin. Om däremot resistansen är liten, det vill säga stor last, kommer strömmen istället för spänningen att bli stor. Genom att ändra derivatan på strömmen och låta strömmen och lasten vara konstant undersöktes hur överspänningen ändrades. Vid en ökning av derivatan med 3 gånger från 1 MA/s till 3 MA/s ökade även överspänningen 3 gånger från 90 V till 250 V. Det vill säga att ändringen av överspänningen var direkt proportionell mot ändringen av derivatan.

I figur 22 visas strömmen som flyter genom säkringen.



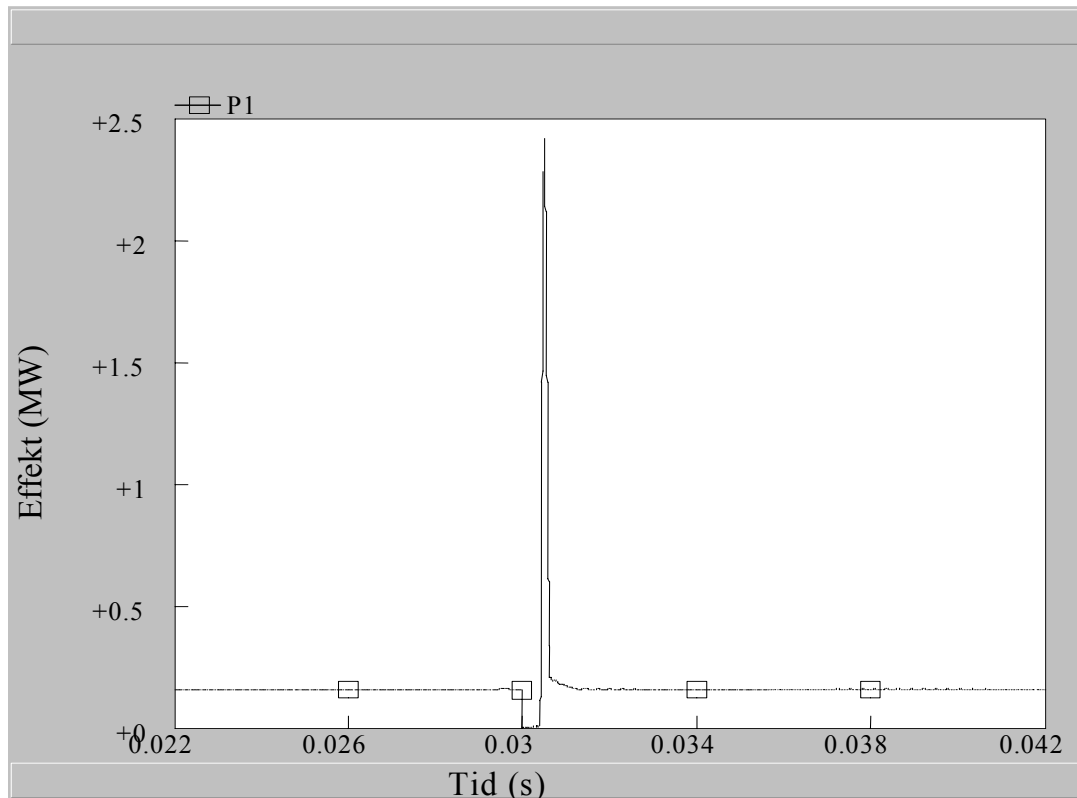
Figur 22. Strömmen genom säkringen under simuleringen.

Energin som kommer att finnas kvar i induktanserna i kretsen på grund av att strömmen avbryts ges av

$$E = \frac{1}{2} I^2 L$$

där I är den ström som avbryts och L är induktansen i vilken strömmen flyter. När derivatan och lasten hölls konstant och amplituden på strömmen ändrades blev det ingen större förändring i den uppkomna överspänningen. Däremot ökade den extra energi som tillfördes lasten.

I figur 23 visas hur den levererade effekten till lasten varierar under simuleringen.



Figur 23. Effekten till lasten under simuleringen.

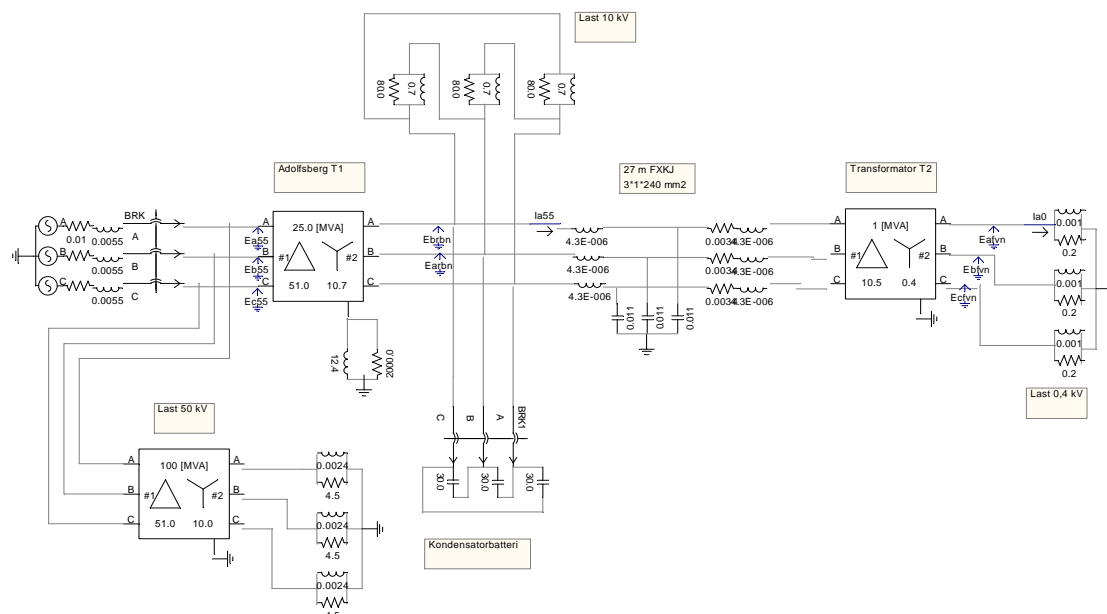
I simuleringen varierades lasten på nedsidan av transformator 2 medan strömmen och dess derivata hölls konstant. Då lasten var mindre än 10 % av transformatorns märkeffekt blev den extra effekt som transporterades till lasten då strömmen bröts mer än 8 gånger lastens effekt. Med ökad last minskade detta förhållande, när lasten var 80 % av transformatorns märklaster blev den extra tillförda effekten endast 1,5 gånger lastens. Däremot blir den totala effekten, och då även energin, som transporteras till lasten större med ökad last, till exempel vid 1,6 MW last levererades en effekt om 4,2 MW vid strömbrytningen medan vid 0,16 MW last levererades endast 1,4 MW.

Diskussion

Den uppkomna överspänningen beror proportionellt på storleken av strömderivatan och som i de andra simuleringarna och även i laboratorieförsöken visar resultaten även att ju större lasten är desto mindre blir överspänningen. Resultaten visar också att även om spänningen blir liten så levereras extra energi till lasten.

Simulering av fall 3, tillslag efter service

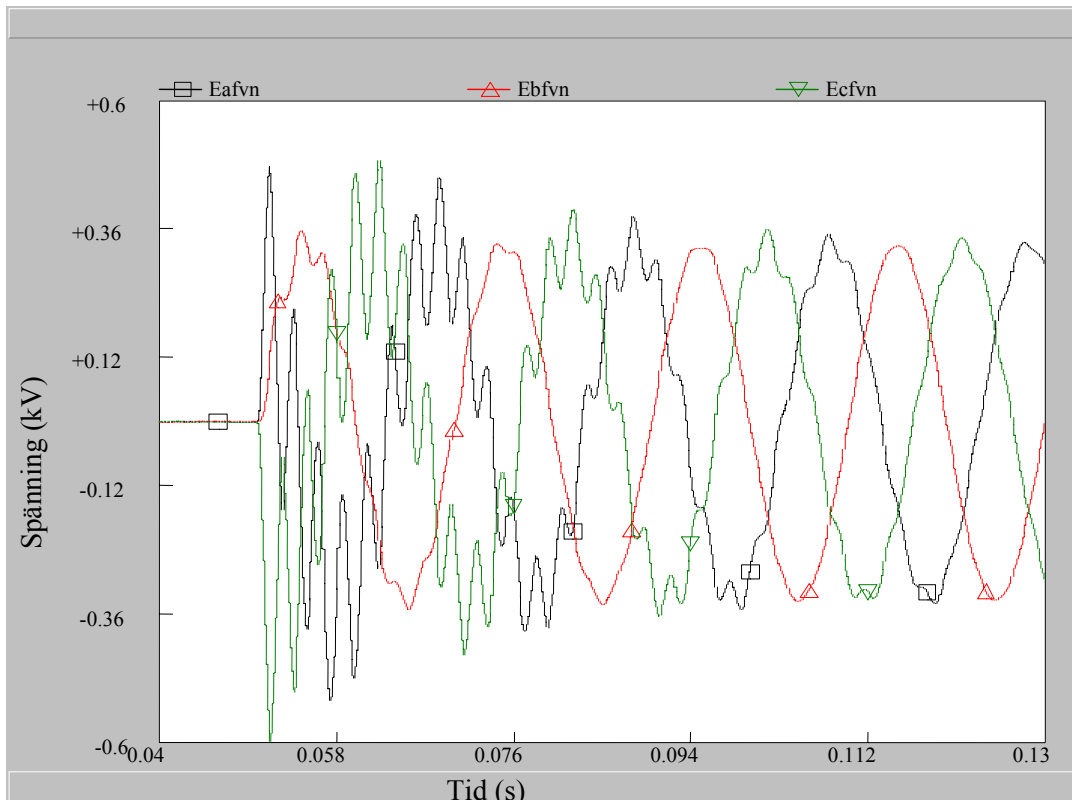
Som nämnts innan så havererade 19 stycken hubbar i en fabrik i samband med kopplingar vid strömavbrott på grund av service på elanläggningen. Innan anläggningen bröts hade lasten dragits ner, alltså var även lasten liten vid tillslag av anläggningen också. När servicen var utförd togs anläggningen åter i bruk, detta var strax innan en helg. När fabriken startade igen efter helgen upptäcktes haverierna. Genom att simulera en liknande modell av fabriken inmatning undersöks de spänningar som kan tänkas uppstå vid frånslag och tillslag av anläggningen. I figur 24 visas simuleringssmodellen.



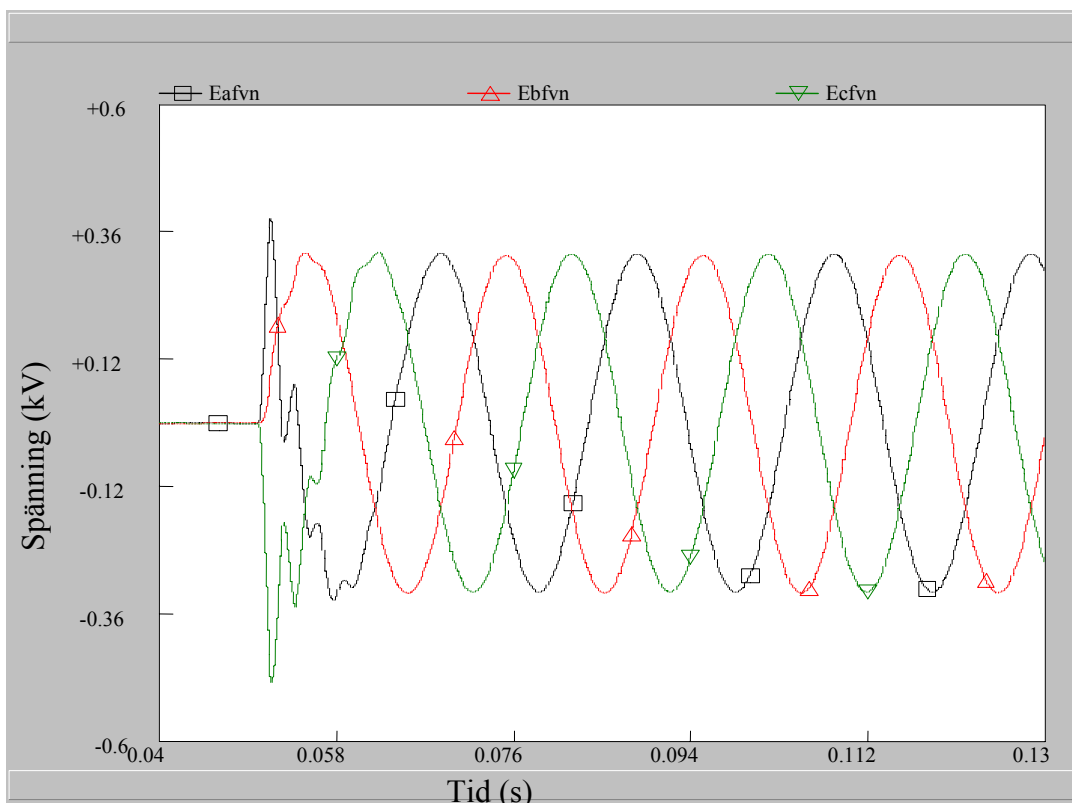
Figur 24. Simuleringssmodell av anläggningens inmatning.

Effekten på transformator T2 uppskattades till 1 MVA medan effekterna på shuntkondensatorn, 3,2 MVar, och transformator 2, 25 MVA, var kända. Ledningarna mellan apparaterna uppskattades även de och de borde inte ha någon större inverkan på resultatet eftersom dess kapacitans och induktans är förhållandevis liten jämfört med övriga apparater.

I figur 25 visas spänningen i lågspänningsanläggningen då tillkopplingen sker med kondensatorbatteriet anslutet och utan att någon last är ansluten. I figur 26 visas spänningen då lasten i 10 kV nätet ökats till cirka 20 % av märkeffekten på transformator T1.



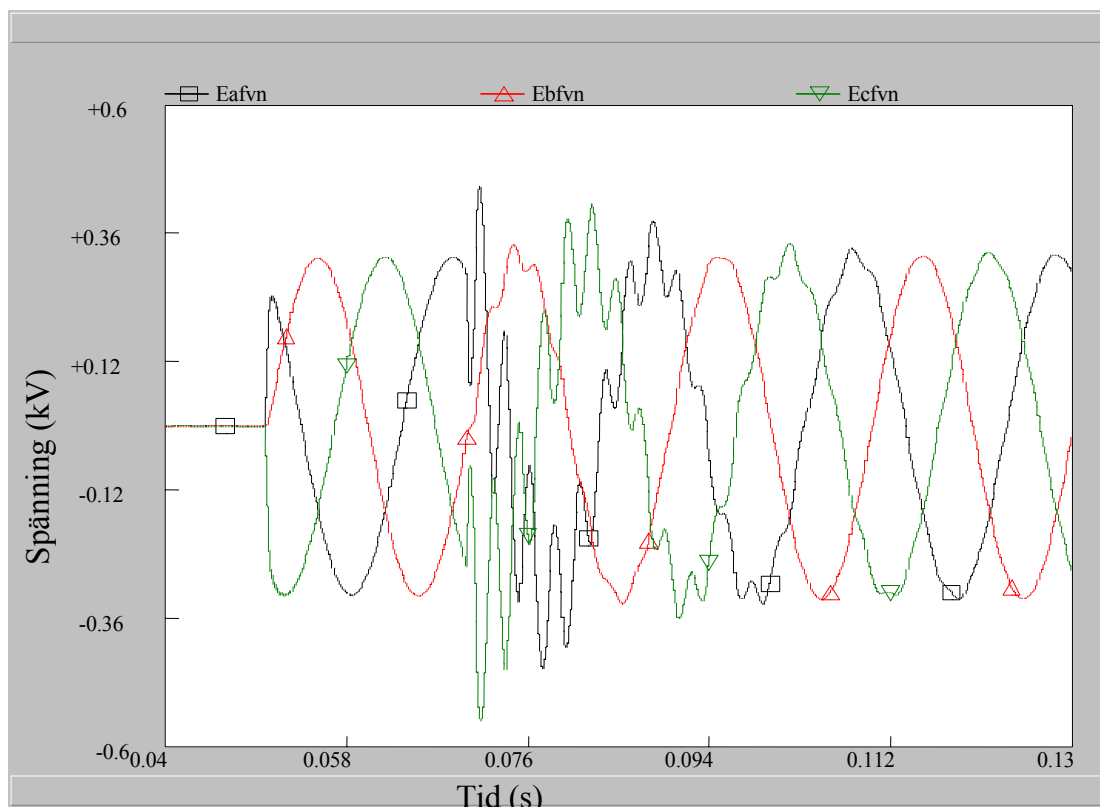
Figur 25. Spänningen på nedsidan av transformator T2 när ingen last är ansluten.



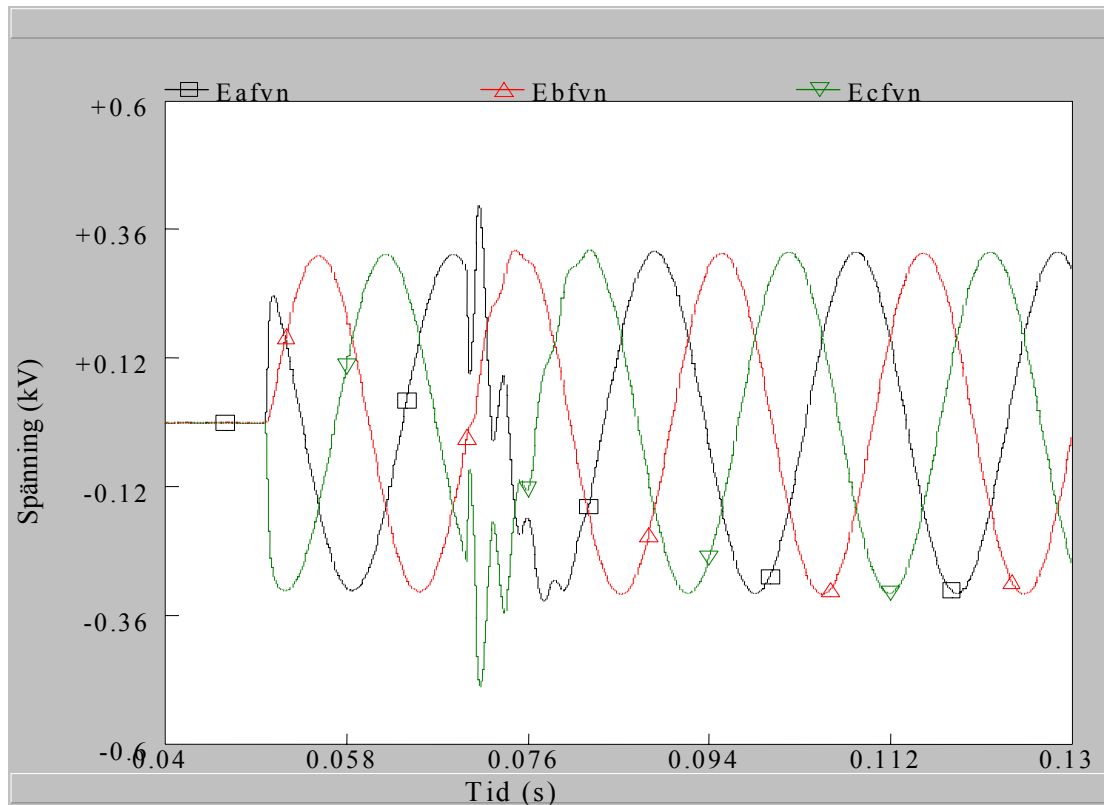
Figur 26. Spänningen på nedsidan av transformator T2 när last är inkopplad.

I figurerna 25 och 26 syns att lasten har en dämpande effekt på oscilleringen och amplituden på överspänningen. Som mest blir spänningen 610 V, detta betyder en överspänning på 85 %, vid oscillationsfrekvensen 0,4 kHz då ingen last är ansluten.

I figur 27 visas spänningen då tillslaget av shuntkondensatorn sker efter tillkoppling av anläggningen i övrigt när ingen last är ansluten. I figur 28 visas samma förlopp då lasten är ansluten.



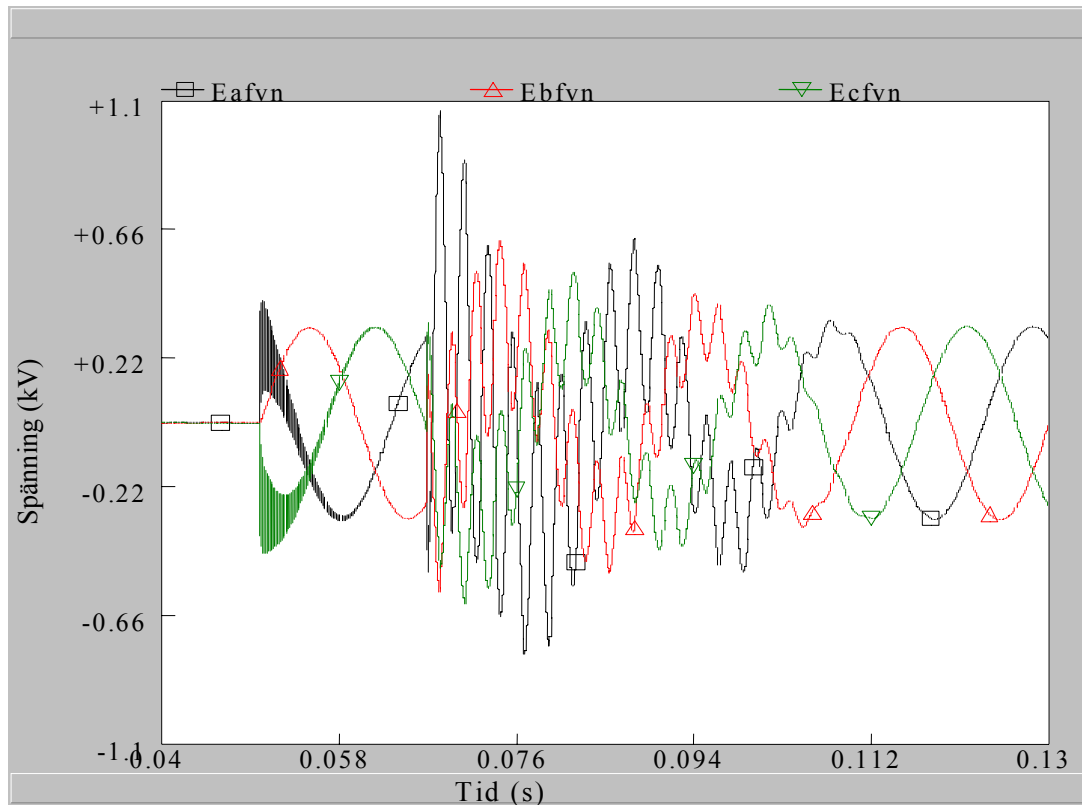
Figur 27. Spänningen i lågspänningsanläggningen. Tillkoppling av kondensatorbatteriet sker då transformatorn är tillkopplad. Utan last.



Figur 28. Med last.

I figur 27 syns att oscillationen dämpas något snabbare jämfört med då kondensatorn spänningssattes samtidigt som transformatorn. I figur 28 syns även här att lasten har en dämpande inverkan.

I figur 29 visas spänningen då shuntkondensatorn är uppladdad vid spänningssättning.



Figur 29. Kondensatorn uppladdad vid tillslag.

Spänningen på kondensatorn och nätet är respektive $-V_{Max}$ och $+V_{Max}$ på fas a vid tillkopplingen. Detta betyder att spänningen kommer att anta värdet $-V_{Max}$ vid tillkopplingen, alltså en förändring på $2V_{Max}$. Toppvärdet på oscillationen blir då

$$V_{Max} + 2V_{Max} = 3V_{Max} = 3 \cdot \sqrt{2} \cdot 230 = 975V$$

I figuren blir spänningen som mest cirka 1 kV, vilket stämmer bra med det uträknade värdet.

Diskussion

Beroende på i vilken ordning apparaterna spänningssattes blev resultatet lite olika men gemensamt är att det blir en oscillation som medför att överspänningar på upp till cirka 0,6 kV uppträder.

Laboratorietest

Vid analysen av haverier av många olika apparater vid samma tidpunkt och plats ställdes frågan om en apparats haveri orsakade överspänningar som i sin tur orsakade haveri i andra apparater. En idé var att överspänningar kunde bildas då en säkring bröt en stor ström. I labbet studerades därför strömmen och spänningen i en krets i samband med spänningssättning mot en kortslutning som skyddas av en 6 A säkring.

I frågeställningen om vad som orsakade haverier ställdes även frågan om tillslag av kondensatorer kunde orsaka överspänningar. I laboratoriet studerades därför även tillslag av kondensatorer för att verifiera simuleringsresultaten.

I samband med testerna löses även ekvationerna för systemet och jämförs med laboratorieresultaten för att få bättre förståelse för laboratorieresultaten.

I laborationstest 1 undersöks spänningen, kortslutningsström och nätets impedans. I test 2 undersöks storheterna då en extra induktans placeras innan säkringen. I test 3 och 4 studeras tillkopplingsström och oscillation vid spänningssättning av en kondensator. Sist utförs en beräkning för att verifiera att storleken på kortslutningsströmmen kan förväntas i lågspänningsnätet.

Storheterna uppmättes med ett minnesoscilloskop av märket Tektronix TDS 210 med bandbredden är 60 MHz, max samplingshastighet 1 GS/s och minneslängden 2500 punkter. I mätningarna användes tidbasinställningen 250 μ s, då blir den effektiva samplingshastigheten

$$f_s = \frac{2500}{10 \cdot 250 \cdot 10^{-6}} = 1 \frac{MS}{s}$$

Detta ger ett mätområde på frekvenser upp till cirka 100 kHz.

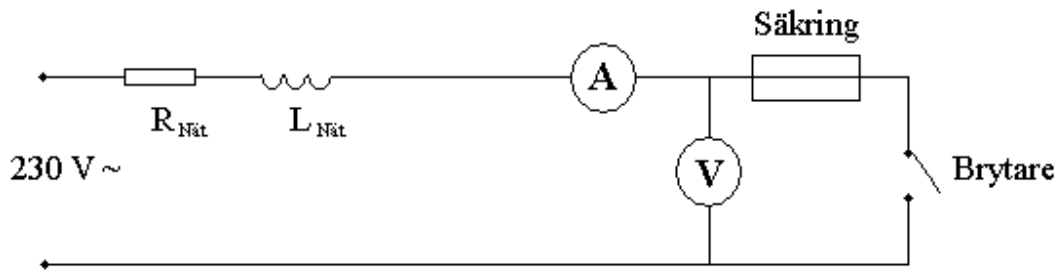
Strömproben som användes var LEM~Flex. Datablad till denna kunde inte hittas men en motsvarande modells maximal ström som kunde mätas var 3000 A, dess bandbredd var 10 Hz-20 kHz och felmarginal 1 %.

Spänningsproben som användes var Tektronix P5200. Maximal mätspänning till denna var 1300 V_{topp} och dess bandbredd 25 MHz.

Nätets kortslutningsström och impedans uppmättes med instrumentet FLUKE 1653 till 1,5 kA respektive 0,15 Ohm.

Kortslutningsprov

I figur 30 visas laborationskretsen vid kortslutningsprovet. Nätets resistans och induktans beräknas utifrån antagande om komponenternas parametrar.



Figur 30. Kretsschema över laborationsuppställningen.

Beräkning av kretsens parametrar

Komponentvärden i kretsen i figur 30 beräknades genom att anta att matande transformators effekt var 0,5 MVA, dess kortslutningsimpedans antas vara rent induktiv och ha värdet $X_k=5\%$. Kabeln från transformatorn var av typen FKKJ 16 mm². Längden på kabeln antas vara 50 m lång och kabelns parametervärden för återledaren är densamma som fasledaren. Induktansen i kretsen blir då

$$L_{Nät} = L_{Trafo} + L_{Kabel} = X_k \frac{V^2}{S * \omega} + L_{Kabel} = 0,051 + 0,027 = 0,078 \text{ mH}$$

och nätets resistans blir

$$R = \sqrt{Z^2 - X^2} = \sqrt{0,15^2 - 0,024^2} = 0,148 \Omega$$

Vilket stämmer bra med 0,12 Ω som är det teoretiska värdet på kabelns resistans.

Ekvationen för spänningen i kretsen i figur 30 är

$$V_{Nät} = R \cdot I + L \frac{di}{dt} + V_{Säkring}$$

Strömmen i kretsen börjar inte avta förrän då derivatan blir negativ, i ekvationen syns att detta inträffar då spänningen över säkringen blir

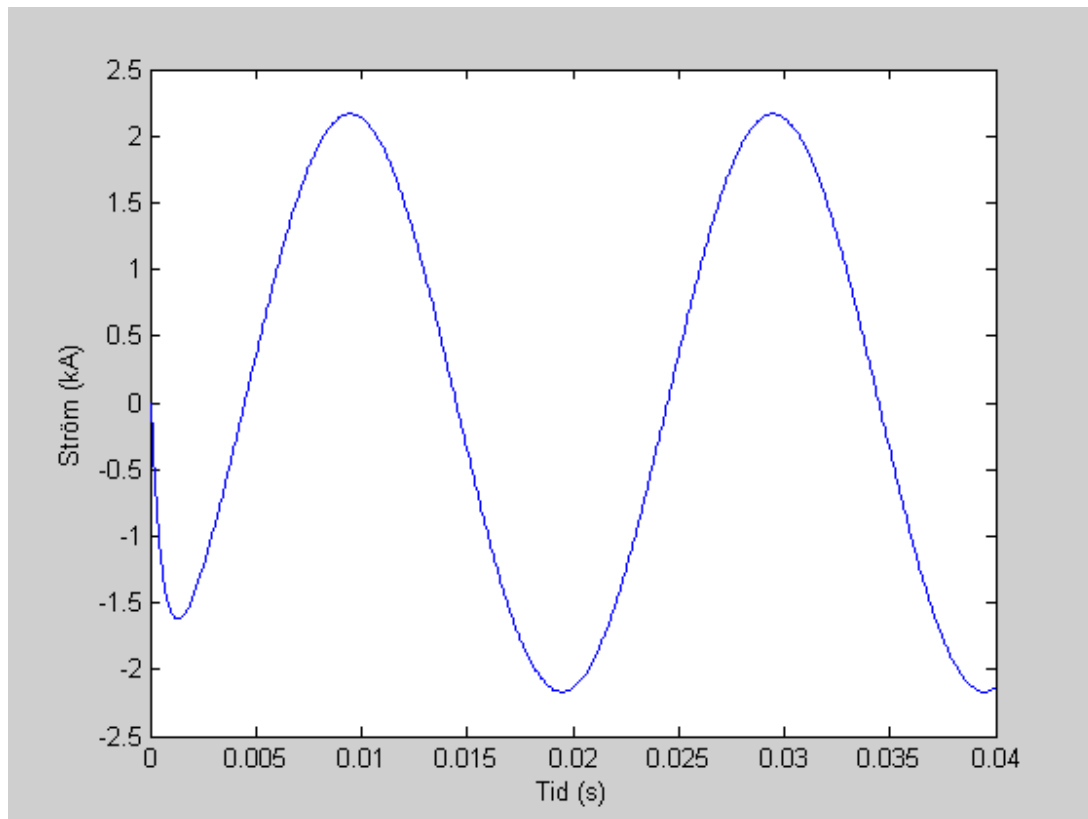
$$V_{Säkring} = V_{Nät} - R \cdot I \quad (2)$$

Detta är dock inte uppfyllt i början av kortslutningen utan spänningen över säkringen börjar inte att öka förrän resistansen i säkringen ökar på grund av att en ljusbåge bildas då metallen förångas på grund av den höga temperaturen.

I figur 31 visas den numeriska lösningen av differentialekvationen

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (V_{Nät} - R \cdot I) \quad (3)$$

med $V_{nät}=325\sin(100\pi \cdot t+1.9)$ V, $L=0,078$ mH och $R=0,148$ Ohm.

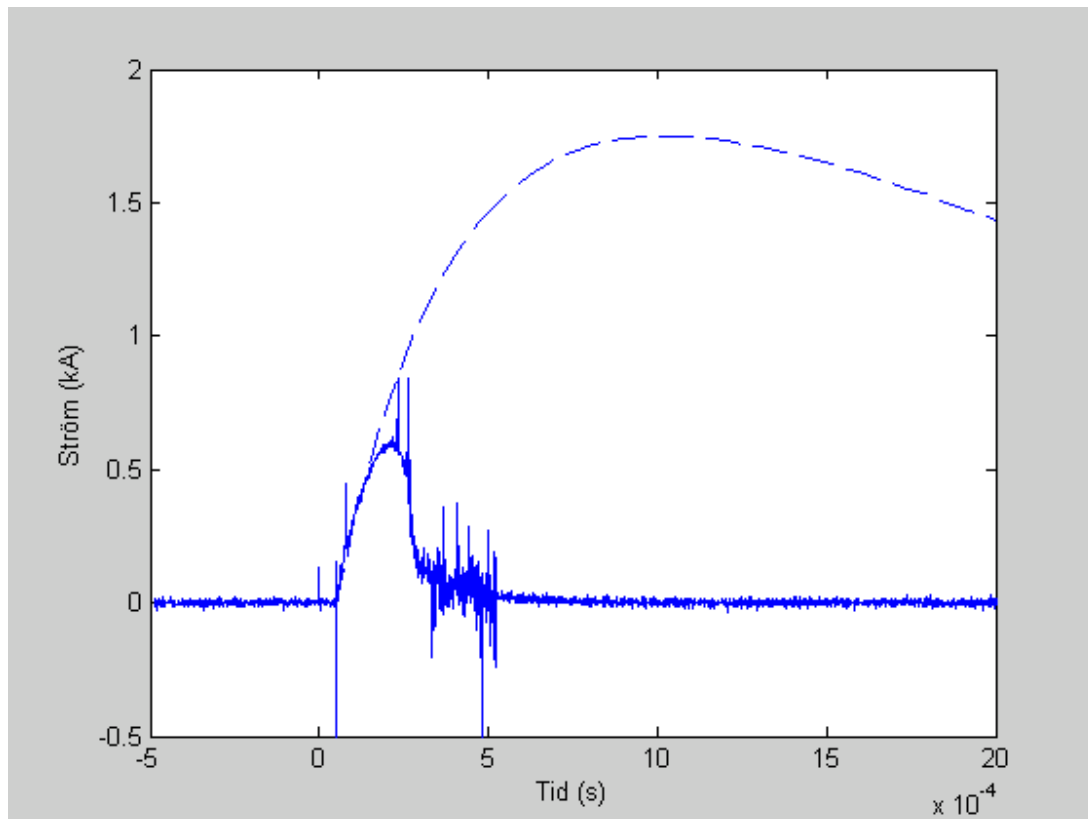


Figur 31. Kortslutningsströmmen i kretsen uträknad vid numerisk lösning av ekvation (3).

Lösningen stämmer bra med den kortslutningsström som uppmättes till 1,5 kA med instrumentet Fluke 1653.

Uppmätta resultat

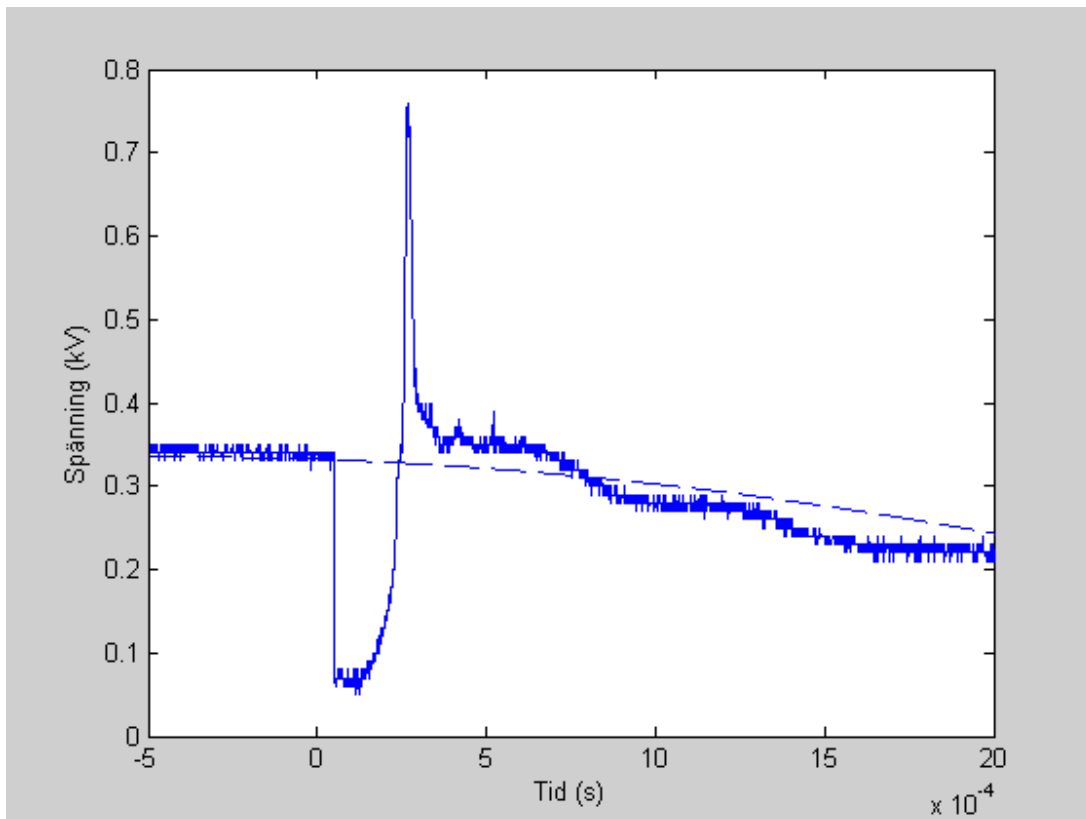
I figur 32 visas strömmen som uppmättes då en säkring utsätts för kortslutning samt kurvan till lösningen till ekvation (3) med $V_{\text{Nät}}=325\sin(100\pi*t+1,7)$ V, $L=0,05$ mH och $R=0,148$ Ohm.



Figur 32. Den heldragna kurvan är den uppmätta strömmen under kortslutningen och den streckade kurvan är lösningen till ekvationen (3).

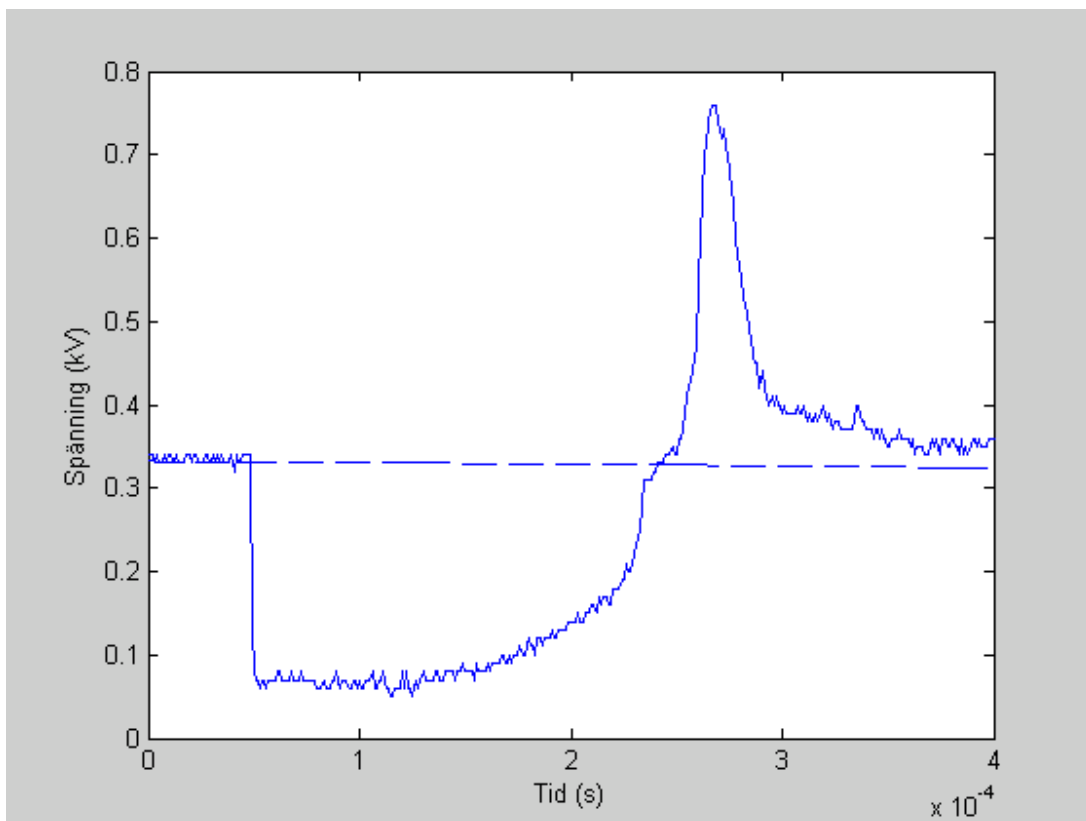
Den numeriska lösningen på kretsens ekvation stämmer bra med den uppmätta strömmen i figuren. Detta tyder på att den uppskattade induktansen på 0,078 mH är i rätt storleksordning.

I figur 33 visas spänningen under kortslutningsförloppet samt referenskurvan $V=325\sin(100\pi*t+1,7)$ V.

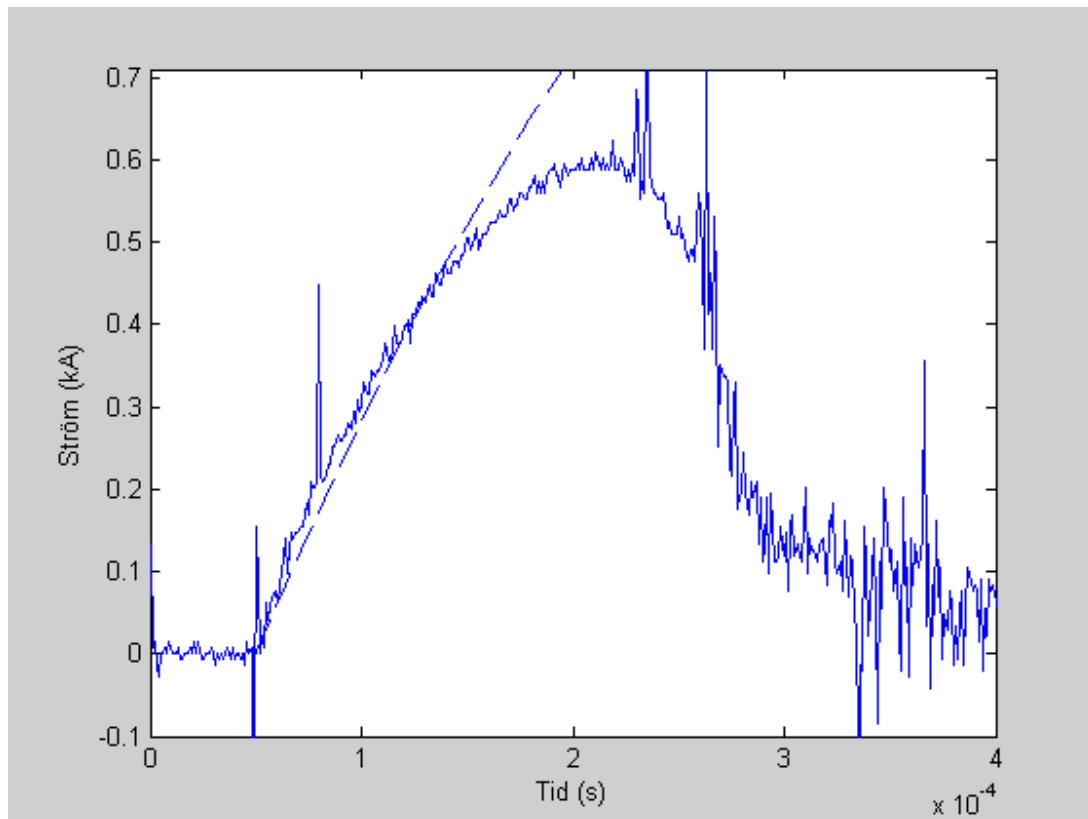


Figur 33. Den heldragna kurvan är den uppmätta spänningen och den streckade är referenskurvan.

I figur 34 och 35 visas förstoring vid den tid då strömmen bryts av säkringen.



Figur 34. Förstoring av figur 33.



Figur 35. Förstoring av figur 32.

Med värden insatta från figur 35 vid tiden 0,22 ms blir, enligt ekvation (2), spänningen över säkringen

$$V_{\text{säkring}} = -300 + 0,148 \cdot 580 = -214V$$

Vilket stämmer ganska bra med spänningen i figur 34 vid samma tid som är -160 V. I artikeln [9] finns beskrivet ett antal hur impedansen för högre frekvenser än 50 Hz ökar vid en kortslutning i kretsen. Ökningen sker mest i resistansen medan reaktansen är i princip konstant. Detta kan vara en bidragande orsak till skillnaden i uppmätt och beräknad spänning, resistans i kopplingar kanske inte heller kan försummas.

Spänningstoppen på 750 V vid 0,27 ms uppstår ur sambandet

$$V_L = L \frac{di}{dt}$$

Ur figur 35 fås att derivatan ligger i intervallet 4,4-10 MA/s vid tiden 0,25-0,29 ms, detta medför att överspänningen ligger i intervallet 220-500 V vid induktansen 0,05 mH och i intervallet 440-1000 V vid induktansen 0,1 mH. Den uppmätta överspänningen 450 V i figur 34 vid tiden 0,27 ms ligger då mitt i intervallet, vilket tyder på att uppskattad induktans på 0,078 mH stämmer bra.

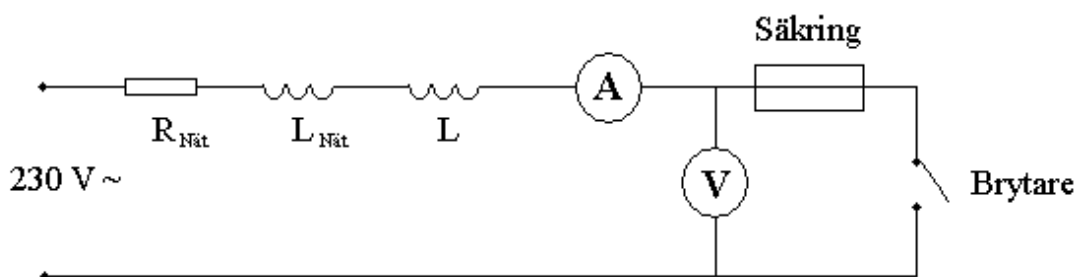
Strömkurvan i figur 33 jämfördes med den simulerade strömkurvan i figur 17. Vid derivatan 6,8 MA/s i simuleringen blev överspänningen som den uppmätta, 750 V.

Kurvornas utseende skiljer något åt, detta betyder att arean under strömkurvan, som är proportionell mot den genomsläppta energin, blir olika. Men de parametrar som inverkar mest på överspänningen borde vara den ström som bryts samt dess derivata, därför borde inte resultaten avvika nämnvärt på grund av detta. När toppvärdet för strömmen i kvadrat i simuleringen multiplicerat med tiden det tog för att nå detta toppvärde, $I_{\text{Topp}}^2 t$, blev 50 stämde toppvärdet på strömmen bra med laboratorieresultaten.

Den simulerade spänningskurvan i figur 18 har långsammare stig och falltid än den uppmätta kurvan i figur 34. Hela överspänningsförloppet tar 0,1 ms för den simulerade medan den tar 0,04 ms för den uppmätta kurvan.

Kortslutningsprov med extra induktans

Nedan följer en beskrivning av två kortslutningstester med extra induktans insatt i kretsen för att undersöka vilka spänningar som kan uppstå. I figur 36 visas kretsschemat över laborationsuppställningen. Den extra induktansen L var 0,3 mH respektive 3,3 mH vid de olika testerna.

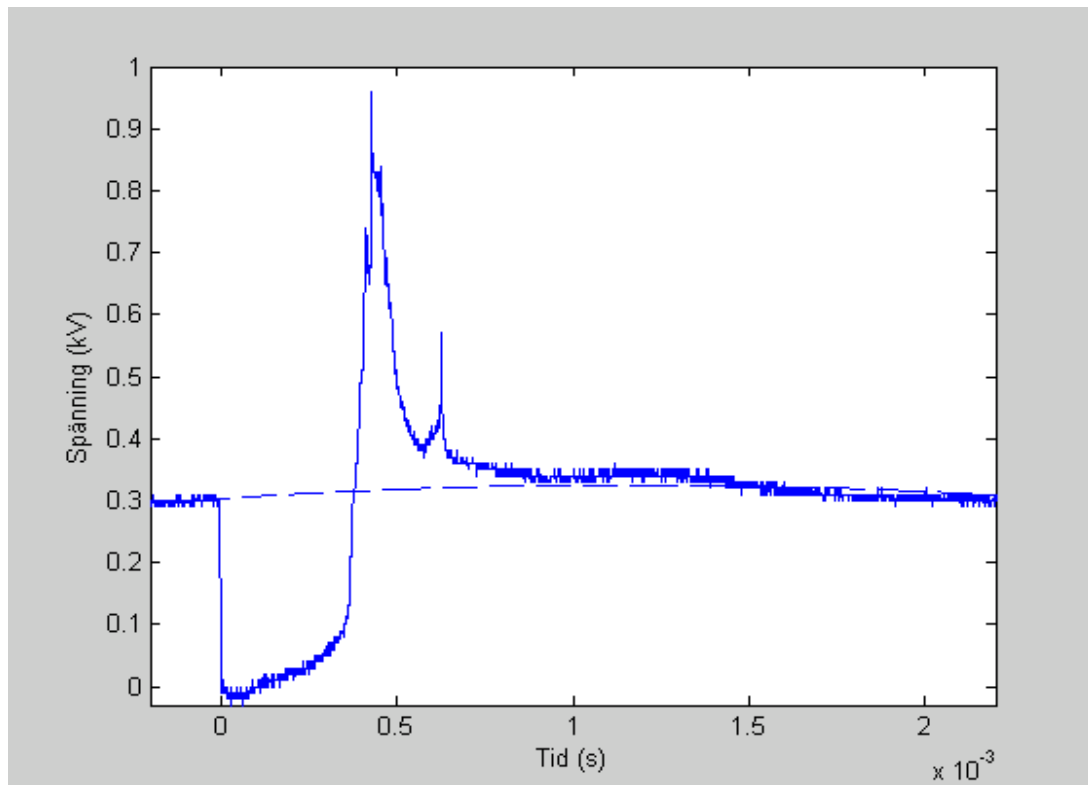


Figur 36. Kretsschema över laborationsuppställningen.

Den nya kortslutningsströmmen beräknades till 1,2 kA med tidigare antagen resistans och induktans när den extra induktansen var 0,3 mH och till 0,22 kA när induktansen på 3,3 mH kopplades in.

Uppmätta resultat

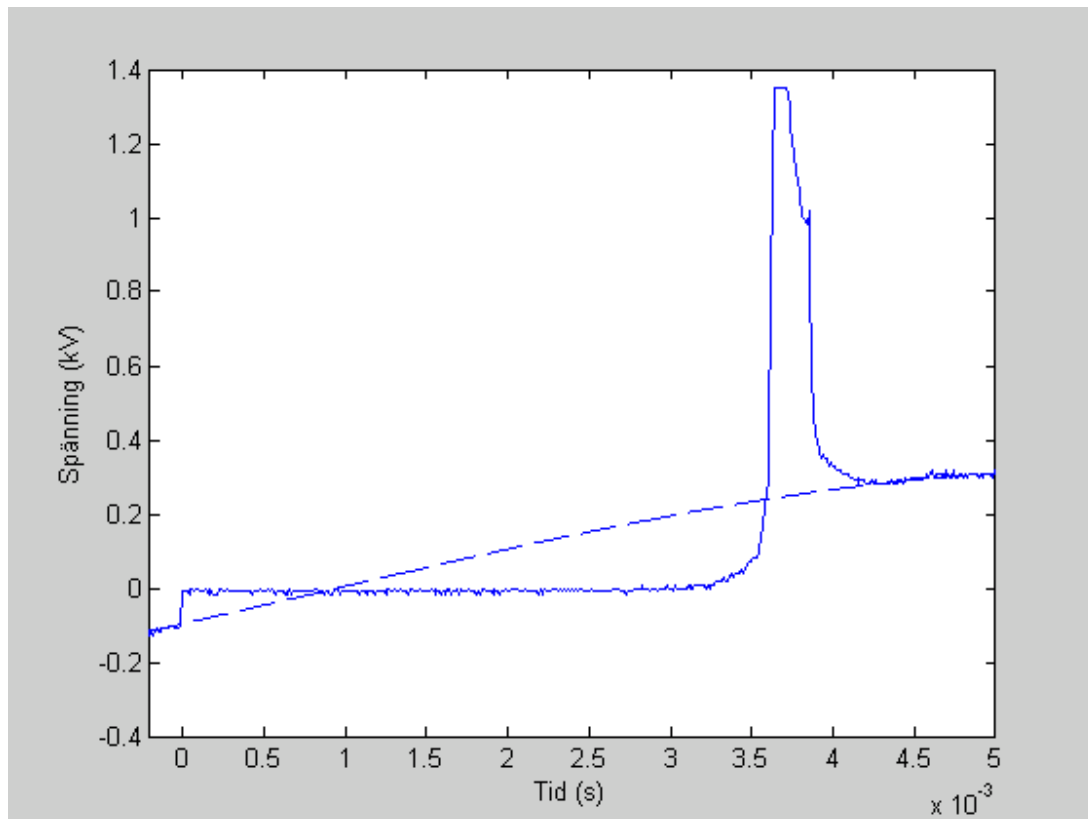
I figur 37 visas den uppmätta spänningen samt referenskurvan $325\sin(100\pi t + 1.2)$ V under kortslutningsförloppet med extra induktans på 0,3 mH.



Figur 37. Den heldragna kurvan är den uppmätta spänningen under kortslutningsförloppet och den streckade är referenskurvan.

Spänningstoppen i figuren är 950 V, alltså en överspänning på cirka 640 V.

I figur 38 visas den uppmätta spänningen samt referenskurvan $325\sin(100*\pi*t-0.3)$ V under kortslutningsförloppet med extra induktans på 3,3 mH.



Figur 38. Den heldragna kurvan är den uppmätta spänningen under kortslutningsförloppet och den streckade är referenskurvan.

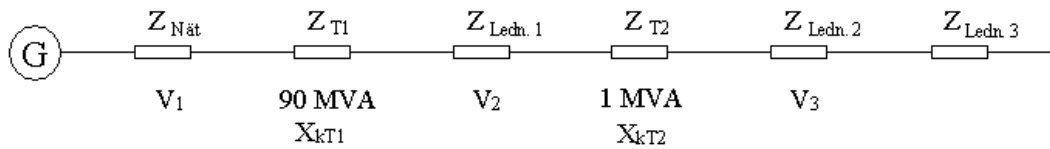
Spänningstoppen i figuren ligger på över 1350 V, en överspänning på cirka 1050 V. Jämfört med spänningen i figur 37 är detta en ökning av överspänningen med 64 % då induktansen ökat med 1100 % i kretsen.

Resultaten visar att snabba strömdrivator kan ge upphov till att stora spänningar bildas över de induktanser som finns i apparater och ledningar. Eftersom frekvensen hos överspänningarna är hög dämpas den dock snabbt i elnätet så det borde endast vara i närheten av dess ursprung som apparater kan påverkas.

Beräkning av kortslutningsströmmar

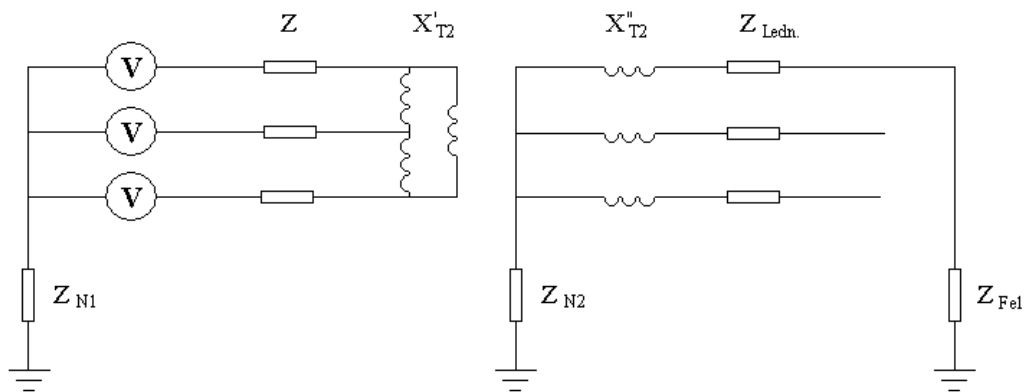
Kortslutningsströmmen på 1,5 kA i laborationerna gav upphov till att spänningar på upp till över 1 kV kunde uppstå vid brytningen av strömmen. Exemplet som följer avser att visa att detta inte är någon orimligt hög kortslutningsström.

En förenklad bild av elnätet visas i figur 39. Ledning 1 antas vara 1 km lång 240 mm² 10 kV kabel, ledning 2 en 100 m lång 150 mm² 1 kV kabel och ledning 3 en 20 m lång 16 mm² kabel. Spänningsnivåerna är $V_1=50$ kV, $V_2=10$ kV och $V_3=0,4$ kV. Kortslutningsimpedanserna är $X_{kT1}=0,07$ p.u. respektive $X_{kT2}=0,04$ p.u.



Figur 39. Översiktsbild av elnätet från generator till felet.

I figur 40 visas en ekvivalent krets för impedanser från generator till felställe.



Figur 40. Ekvivalent krets.

I figuren syns att strömmen genom återledaren i kabel och mark inte har någon förbindelse med matande nät vid ett jordfel.

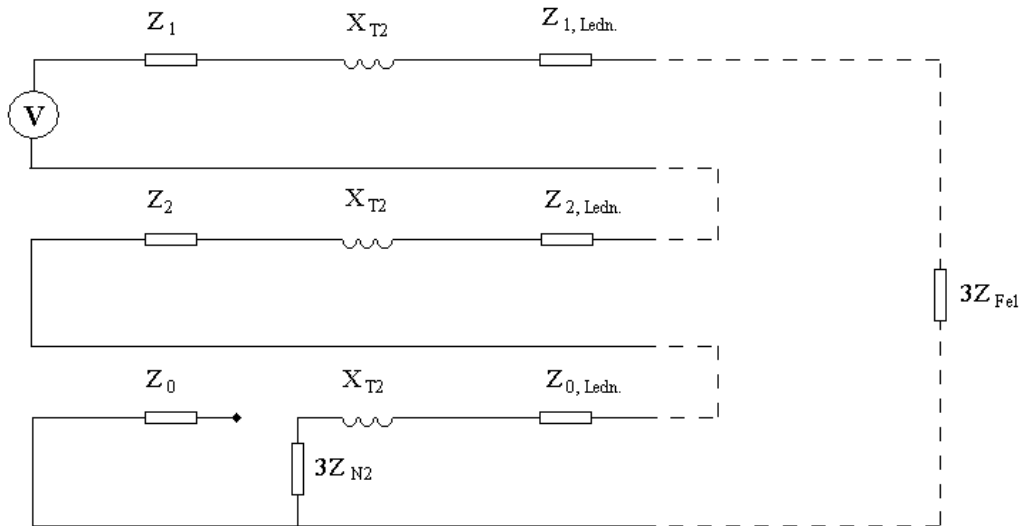
Eftersom enfasigt fel ger osymmetri mellan ledarna måste hänsyn tas till återledaren och kopplingar mellan de olika ledarna. Om strömmarna transponeras till symmetriska komponenter enligt

$$I_S = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = A^{-1}I = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

där

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

och $I_{a,b,c}$ är fasströmmarna och $I_{0,1,2}$ är de symmetriska strömmarna, försvinner kopplingen mellan de olika faserna och strömmar och spänningar i kretsen kan beräknas. Vid enfasigt jordfel blir de symmetriska strömmarna lika stora vilket innebär att de komponentnäten ska seriekopplas, se figur 41.



Figur 41. Impedanser i komponentnätet.

Nätets och transformatorernas impedans antas rent induktiva. Genom att antaga att kortslutningsströmmen är 16 kA i 50 kV-nätet beräknades nätets impedans till

$$X_{\text{Nät}} = \frac{V_{\text{Nät}}}{I_{\text{Kortslutning}}} = j3,1\Omega$$

I tabell A2 i appendix finns de impedansvärden på kablarna som användes i beräkningarna. Impedanserna vid de olika spänningsnivåerna gjordes om till p.u. värden enligt

$$Z_{p.u.} = \frac{Z}{Z_{\text{Bas}}} = Z \frac{S_{\text{Bas}}}{V_{\text{Bas}}^2}$$

där S_{Bas} är 1 MVA och V_{Bas} är spänningsnivån i vilken impedansen finns. De sekventiella impedanserna beräknades enligt figur 41, nollpunktsimpedansen och impedansen till jord vid felet antas vara noll, till

$$Z_0 = jX_{T2} + Z_{0,\text{ledning}2} + Z_{0,\text{ledning}3} = j0,1 + 1,3\Omega$$

$$Z_1 = Z_2 = jX + jX_2 + Z_{1,\text{ledning}2} + Z_{1,\text{ledning}3} = j0,1 + 0,3\Omega$$

de symmetriska strömmarna blir

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2} = 0,52 p.u.$$

strömmen i fasledaren blir enligt ekvation (4)

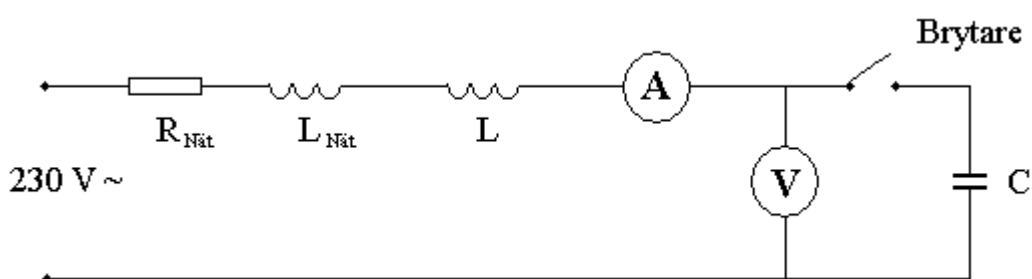
$$I_a = 3I_{0,p.u.} \frac{S_{\text{Bas}}}{\sqrt{3} \cdot V_{\text{Bas}}} = 2,2 kA$$

Exemplet visar att kortslutningsströmmar på några kA kan förväntas i lågspänningsnätet och därmed är resultaten från laborietesterna relevanta i det avseendet.

Kondensator tillkoppling

Denna laboration utfördes för att verifiera beteendet på spänningen och strömmen vid tillkoppling av kondensatorer jämfört med simuleringen. I samband med laborationsresultaten löstes även ekvationen för systemet och resultaten jämfördes.

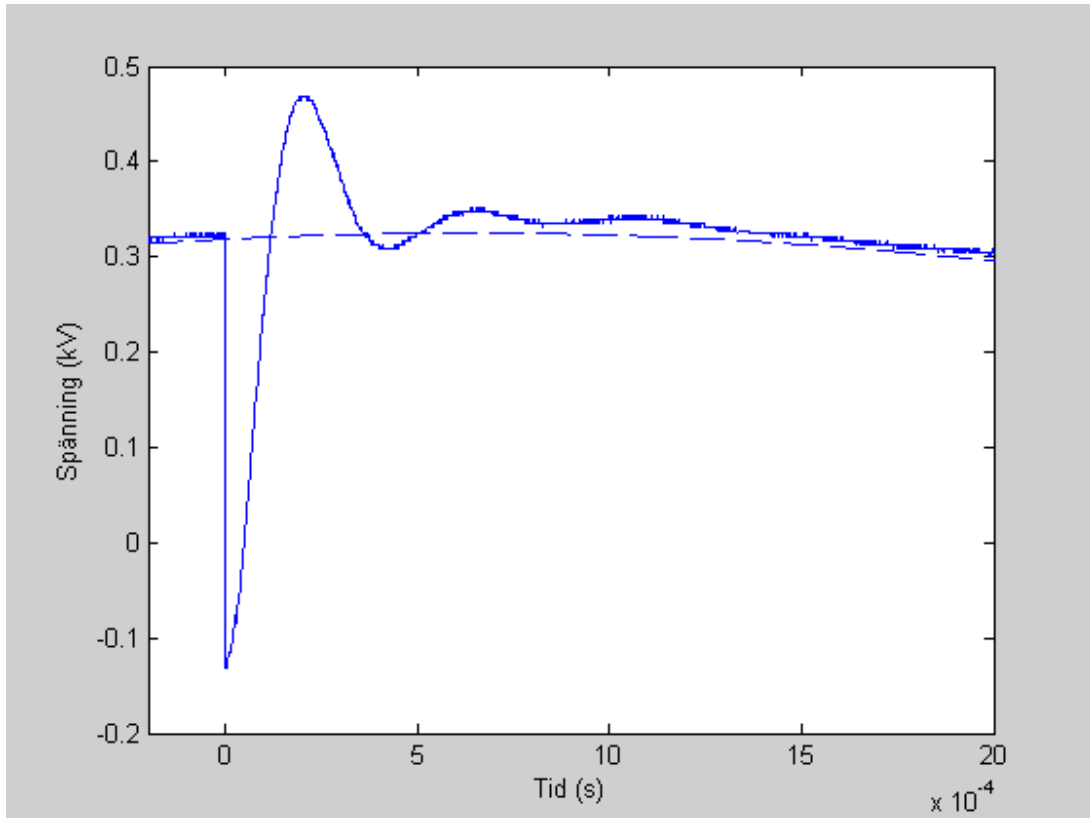
I figur 42 visas kopplingsschemat för laborationskretsen. Induktansen i nätet beräknades med hjälp av svaret vid tillkopplingen.



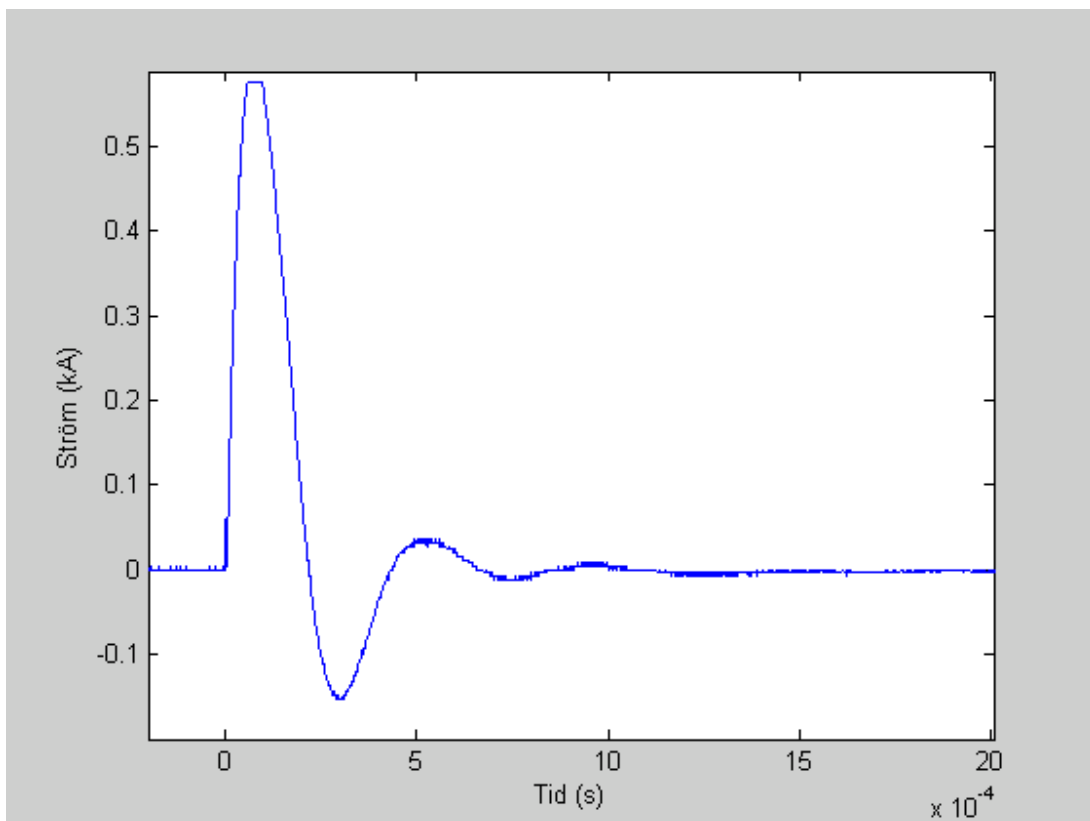
Figur 42. Laboratiekretsen.

Uppmätta resultat

I figur 43 visas spänningen och referenskurvan $325\sin(100\pi*t+\pi/2-0.2)$ och i figur 44 visas strömmen vid tillkopplingen av en kondensator med kapacitansen $112\ \mu\text{F}$.



Figur 43. Den heldragna kurvan är spänningen under mätningen och den streckade är referenskurvan.



Figur 44. Strömmen vid tillslag av kondensatorn.

Oscillationsfrekvensen mellan induktansen och kapacitansen beräknades ur figurerna 43 och 44 till

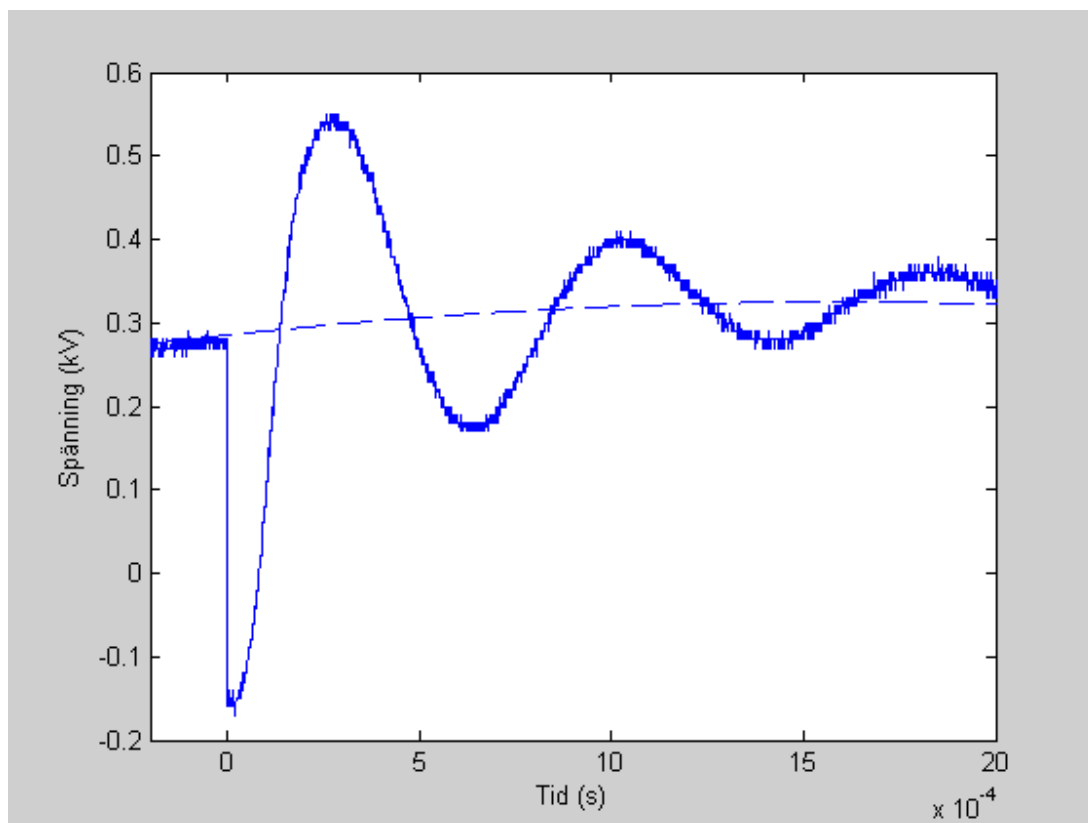
$$f = \frac{1}{T} = 2,1kHz$$

Induktansen i nätet kunde då beräknas till

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} = 0,05mH$$

Vilket stämmer bra med uppskattat och beräknat värde på 0.078 mH vid säkringsprovet.

I figur 45 visas spänningen samt referenskurvan $325\sin(100\pi*t+\pi/2-0.5)$ vid tillslag av kondensatorn då en extra induktans med värdet 0,3 mH placerats i kretsen.



Figur 45. Den heldragna kurvan är spänningen vid tillslaget av en kondensatorn. Den streckade linjen är referenskurvan.

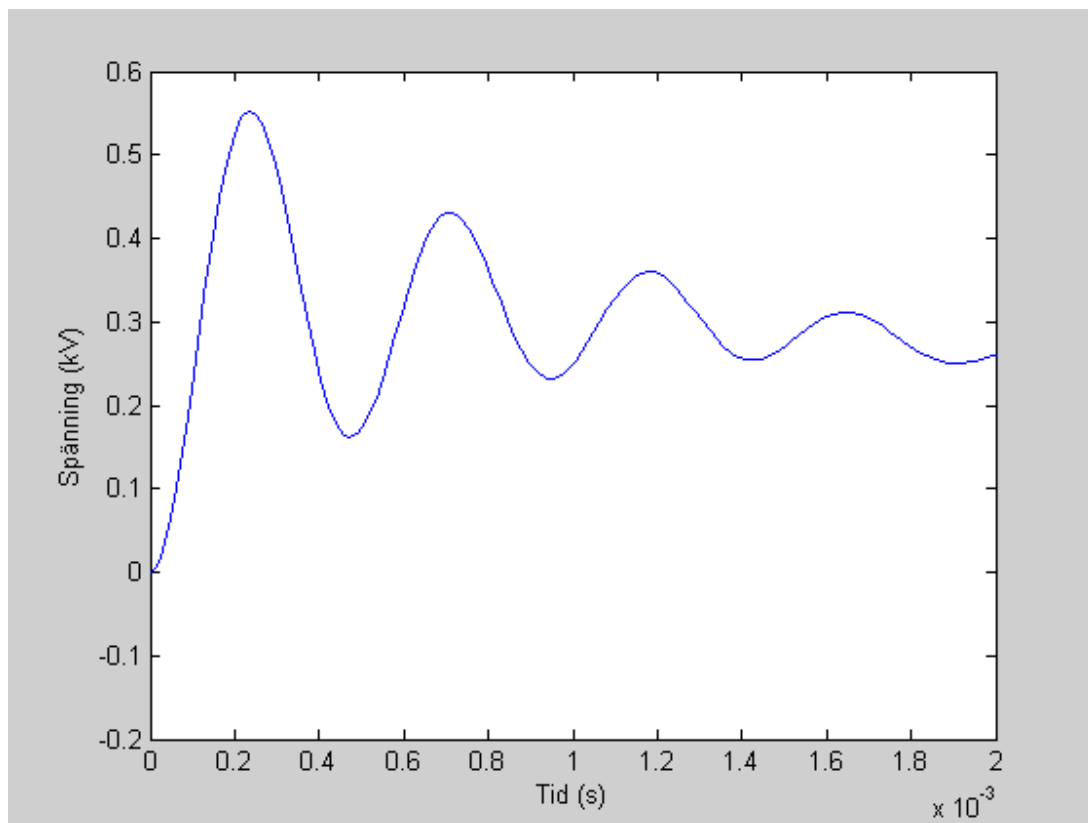
I figur 45 syns att amplituden och varaktigheten på oscillationen då en extra induktans var inkopplad ökade jämfört med då denna saknades, se figur 43.

Numerisk lösning av systemets ekvation

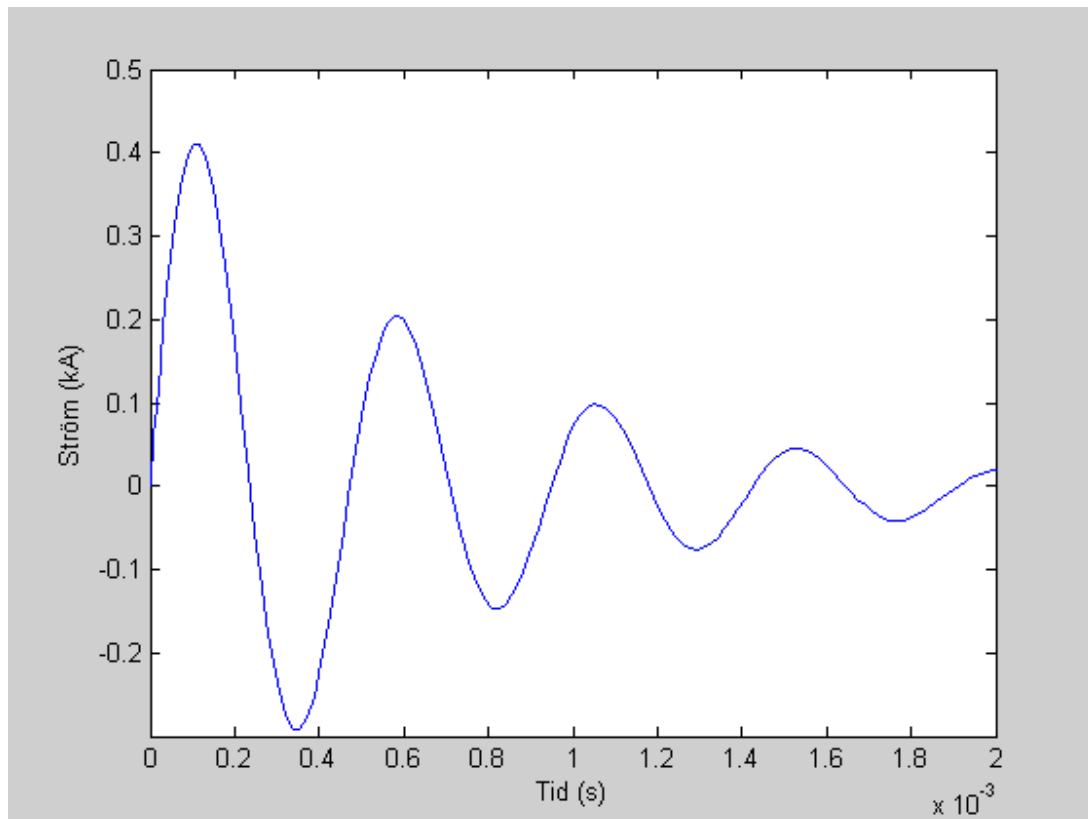
Ekvationerna för systemet i figur 43 ges av

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (325 * \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) - R \cdot i - v_C) \\ \frac{dv_C}{dt} = \frac{1}{C} i \end{cases} \quad (5)$$

där v_C är spänningen över kondensatorn, $L=0,05$ mH och $C=112$ μ F. Figur 46 och 47 visar de numeriska lösningarna av ekvationssystemet.



Figur 46. Spänningen vid lösningen av ekvation (5).



Figur 47. Strömmen vid lösningen av ekvation (5)

Amplituden på de uppmätta storheterna stämmer bra överens med de beräknade i figurerna 43 och 44 medan oscillationen hos de uppmätta storheterna dämpas klart snabbare, orsaken till detta är förmodligen att inkopplad last i systemet dämpar oscillationen.

Derivatans på strömmen i tillkopplingen är 15 MA/s för den uppmätta medan den endast blir 6 MA/s i den beräknade lösningen. Om dock induktansen i den numeriska lösningen minskas till 0,02 mH, vilket är kabelns uppskattade induktans, blir derivatan även här 15 MA/s.

Spänningsfallet, som ges av (5), kan inte överstiga

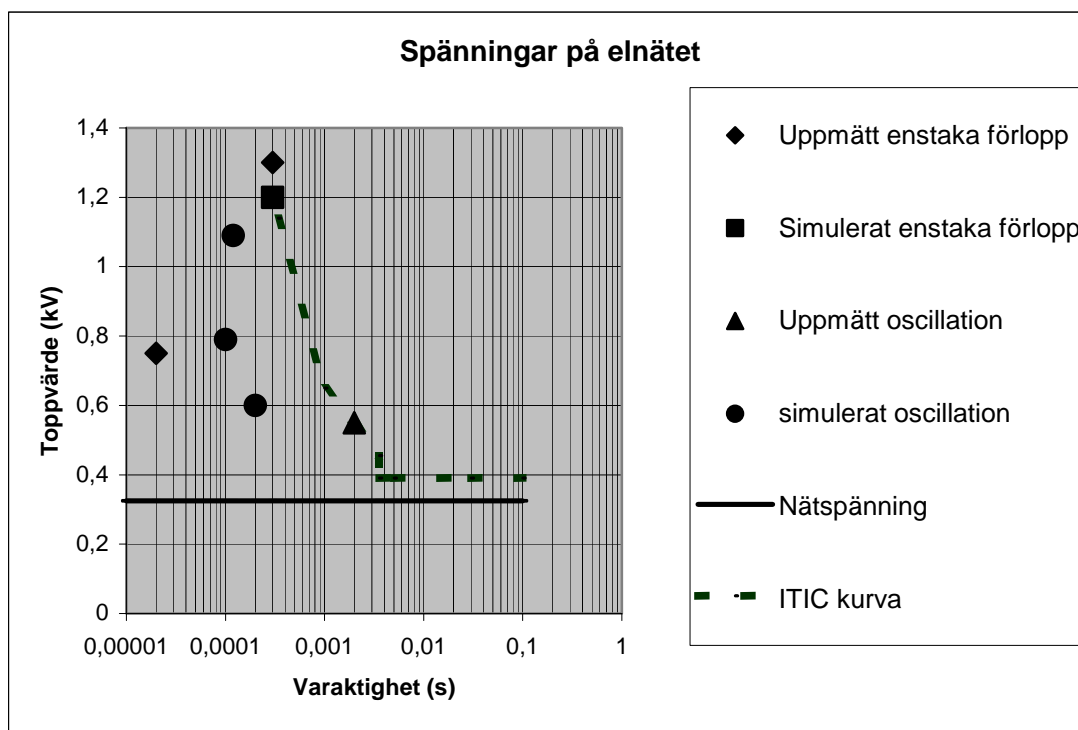
$$V_L = L \frac{di}{dt} = V_{Nät} - Ri - v_C = 325 - R \cdot 0 - 0 = 325V$$

i tillslaget om kondensatorn är oladdad. Förklaringen till att spänningen blir -120 V kan vara att kondensatorn varit uppladdad innan tillkoppling eller att mätningen påverkats av tillkopplingen av kondensatorn.

Laborationstesterna bekräftar simuleringsresultaten i avseende på att den överspänning som kan förväntas vid spänningssättning av kapacitanser och induktanser ligger omkring några hundra volt.

Sammanfattande bild om transienter i elnätet

I figur 48 visas vilka spänningar som enligt resultaten från simuleringar och laborieförsök kan uppstå.



Figur 48. Spänningar uppmätta i laborieförsök och i simuleringar.

I figuren sammanfattas de högsta uppmätta och simulerade spänningarna som funktion av den tid som förloppet är aktivt, det vill säga under den tid som spänningen är över normalt ögonblicksvärde. Dessa resultat kan jämföras med den så kallade ITIC kurvan som är en referenskurva som används i elektronikbranschen och anger hur stor spänning som elektronik får utsättas för. Som syns i figuren har inte några resultat som visar på några skadliga spänningar för elektroniken framkommit. Denna kurva är dock avsedd för 230/127 V system så dess giltighet i 400/230 V system kan därför ifrågasättas. Resultatet från kapitlet *brytning av induktiv ström* på över 30 kV är dock inte medtaget eftersom detta värde ej anses realistiskt.

Diskussion

Simuleringar av en enkel modell av det elnät, se appendix C, där det första haveriet inträffade, med datorn som antändes, utfördes för att undersöka om något onormalt kunde upptäckas. Speciellt undersöktes om stora kapacitanser i modeller av nättaggregat hade någon inverkan i tillkopplingen, något sådant kunde dock inte påvisas. Elnätet är dock ett väldigt komplext system och därför svårt att modellera i minsta detalj. Det vore därför att föredra att modellera en mindre och noggrannare modell i kombination med mätningar utförda i elnätet vid tillslag av större områden.

I laboratorieexperimenten visades dock att stora spänningar kan uppstå vid brytning av en stor ström. Teorin om att ett haveri kan orsaka fler haverier kan därför vara trolig. Eftersom bland annat fakta på vad som gick sönder i de havererade apparaterna inte fanns att tillgå kan inte haveriorsaken närmre bestämmas.

Som orsak till de haverier som inträffade i den beskrivna händelse 2, där kortslutningen inträffade, skulle kunna vara att en överspänning inducerades då strömmen bröts. Om strömmen avbryts då den har riktning från kortslutningen, där spänningen är noll, mot negativ potential i en fas skulle en överspänning uppstå på grund av den energi som lagras i kabelns induktans. Frågan är dock hur vanligt det är att brytaren verkligen avbryter strömmen och intressant är även hur energin i så fall fördelas i de anslutna apparaterna. Det har visats i simuleringarna och i laboratorieexperimenten att överspänningar kan uppstå vid spänningssättning av kondensatorer, även detta kan vara en orsak till att haverierna inträffade.

Vid haveriet undersöktes vad som havererat i hubbarna och det som framkom var att transistorerna i kraftförsörjningen var utförda för att tåla en spänning på max 500 V. Detta är på gränsen till för liten immunitet mot överspänning. Oscillationen vid tillslaget av kondensatorbatteriet kan ha orsakat en spänningshöjning på lagringskondensatorerna i nätaggregatet. Denna höjning kan ha orsakat haveri hos transistorerna. Eftersom spänningshöjningen inte är väldigt stor vid oscillation vid tillslaget av kondensatorer kanske de skyddskomponenter som sitter i elektroniken inte aktiveras vilket i sin tur möjliggör en spänningshöjning.

I standarden för spänningssgodhet på elnätet nämns att nivåer på spänningen kan förväntas ligga på 1,5 kV medan som testnivå för elektronik nämns 1 respektive 2 kV. Detta tycks vara en dålig anpassning mellan dessa olika standarder så en fortsatt utredning kring dessa standarder vore intressant. Det nämns även i [15] att tester av elektroniks hållbarhet mot oscillerande spänningar är undermålig efter dessa inte finns beskrivna i de europeiska standarderna. Det verkar som att det finns en viss osäkerhet om hur oscillation vid kondensatortillslag påverkar elektroniken.

Förslag till fortsatt arbete

Mätutrustning var utplacerad i ett elnät i Staffanstorp i hopp om att registrera någon störning eller transient. Dock inträffade inget under den tid som detta arbete pågick. Som fortsatt arbete skulle fler mätningar kunna utföras, dels för att logga fel men även mäta vid spänningssättning efter avbrott för att undersöka om någon oscillation eller överspänning uppstår. Om något sådant upptäcks skulle det vara intressant att undersöka vilken roll den anslutna elektroniken har på resultatet. Framförallt är det om den stora mängd av inkopplade kondensatorer i nätet kan generera överspänningar vid spänningssättningen.

I rapporten beskrivs att brytning av induktiv ström kan inducera stora spänningar på grund av energin som lagras i induktanserna i ledningar och apparater. Frågan är dock om det inträffar att strömmen avbryts och i så fall med vilken derivata detta kan ske. En fortsättning på denna frågeställningen är att undersöka hur energin fördelas i nätets apparater och vid vilka frekvenser detta sker.

Med tanke på det stora antalet bränder som inträffar i elektronik årligen vore det intressant att ta del av vad som går sönder vid haverier av elektronik och fortsätta att undersöka orsakerna till haverierna. En intressant frågeställning är att elektroniken kanske åldras och därmed inte klarar specifikationerna efter en viss tid.

En sammanställning av vilka skydd som finns och som bör finnas i gränssnittet mellan elektronik och elnät är intressant att göra.

I [3] nämns haverier orsakade av systemfel inte ger berättigande till ersättning, som exempel på systemfel nämns dock bara avbrott. En intressant fråga är då huruvida transienter och överspänningar som orsakas av systemfel tolkas.

Det som framkommit i rapporten visar att det är ett viktigt ämne. Detta arbete kan ses som en början där modeller verifierade med mätningar presenterats och flera uppslag till en fortsättning framställts.

Appendix A

Tabeller

Storhet	Transformator 1	Transformator 2
Kortslutningsreaktans (p.u.)	0,08	0,05
Effekt (MVA)	50	2
Spänning på uppsidan (kV)	130	11
Spänning på nedsidan (kV)	11	0,4
Luftgapsreaktans (p.u.)*	0,2	0,2
Tidskonstant för inrusningsström (s)*	1	1
Knäspänning (p.u.)*	1,25	1,25
Tidskonstant för magnetiskt flöde (s)*	0,1	0,1
Magnetiseringsström (%)	1	0,1

Tabell A1. Parametervärden på transformatorerna i simulering 1.

*Förinställda värden i PSCAD/EMTDC.

Beteckning	Plusföljds-resistans (Ω/km)	Plusföljds-reaktans (Ω/km)	Nollföljds-resistans (Ω/km)	Nollföljds-reaktans (Ω/km)
AKKJ 3x150/41 1kV	0,206	0,07	1,53	0,07
FKKJ 3x16/16 1kV	1,15	0,08	2,57	0,1
AXKJ 3x1x240 10kV	0,206	0,31	---	---

Tabell A2. Impedansvärden på kablar [10].

Appendix B

Matlabkod för lösning av kortslutningsekvationen

```
function di=ekv(t ,I)
L=0.00005;
R=0.148;
di=1/L*(325*sin(100*pi.*t+pi+1.9)-R*I);
```

```
[t,di]=ode45(@ekv,[0 1],[0 0],[]);
```

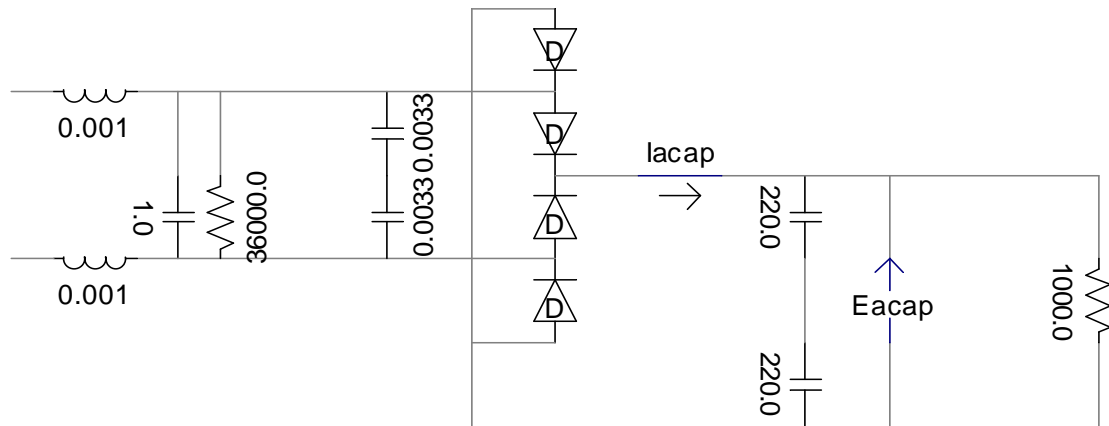
Matlabkod för lösning av kondensatorekvationerna

```
function di=ekvC(t ,IV)
L=0.000078;
R=0.148;
C=112e-6;
di1=1/L*(325*sin(100*pi.*t+pi/2)-R*IV(1)-IV(2));
di2=1/C*IV(1);
di=[di1 di2]';
```

```
[t,di]=ode45(@ekvC,[0 1],[0 0],[]);
```

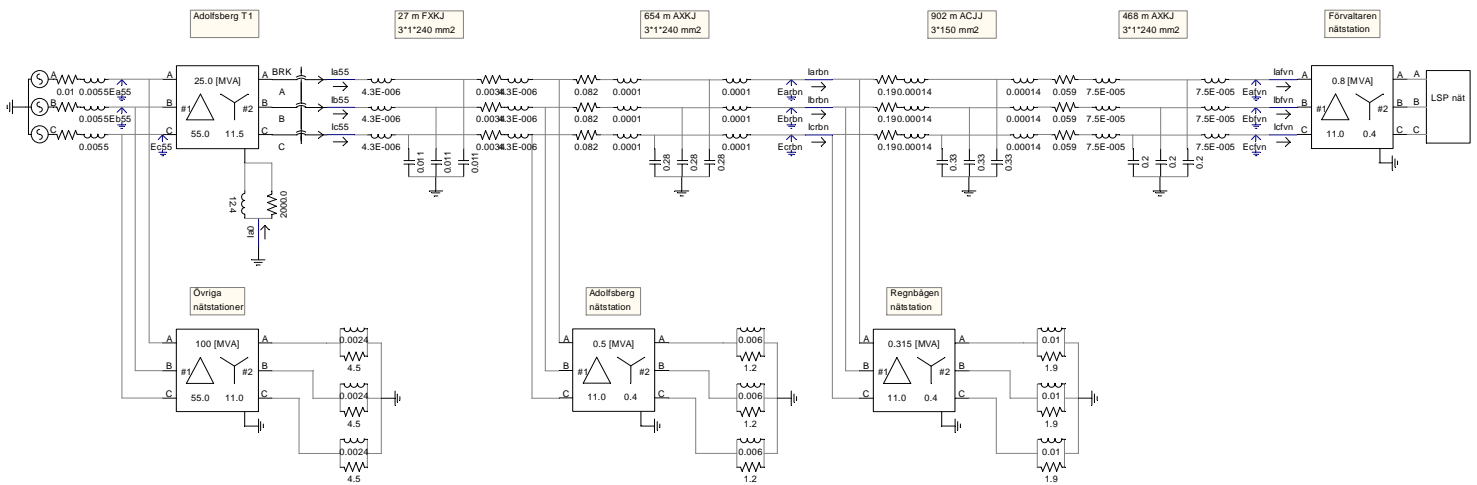
Appendix C

Simuleringsmodell av ett nätaggregat

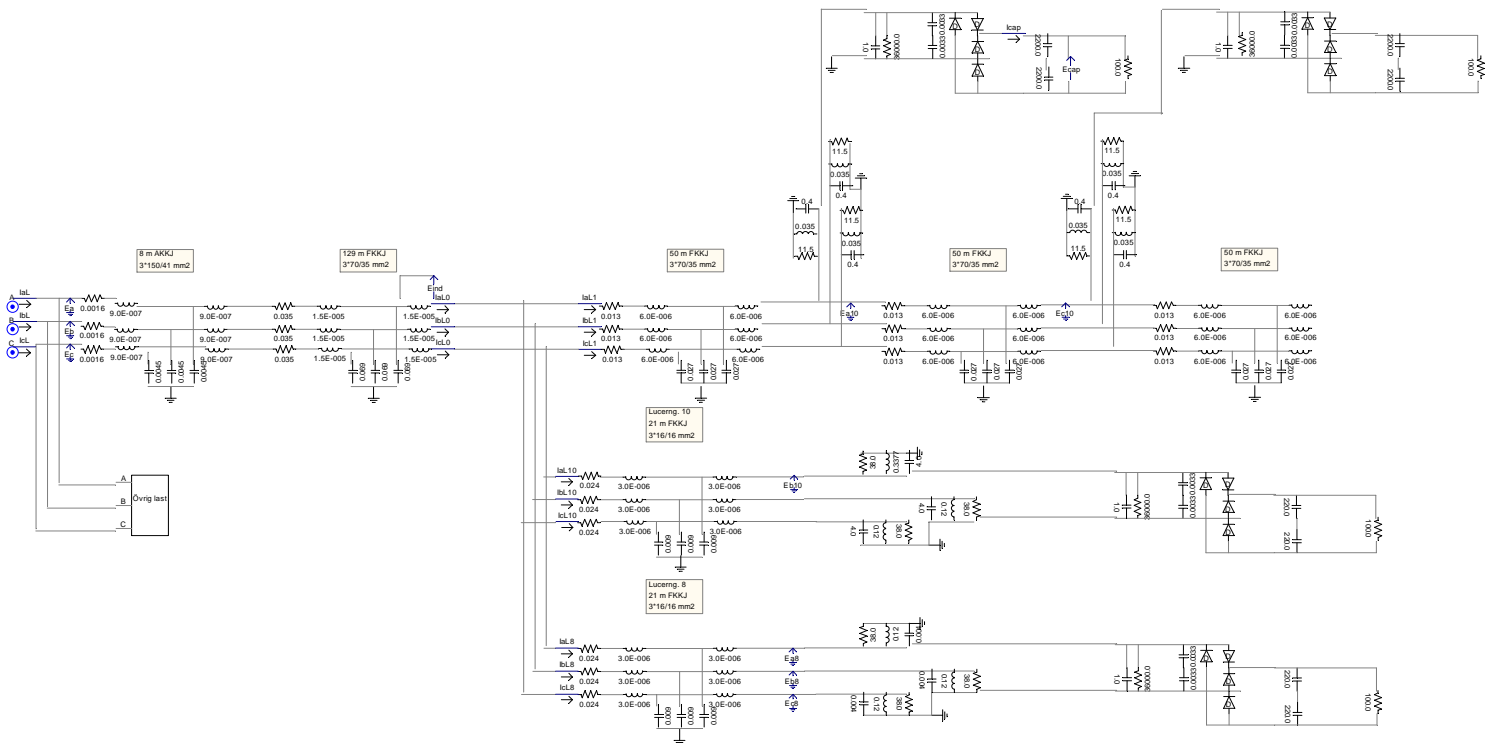


Figur C1. Simuleringsmodell av ett nätaggregat. Induktansens enhet är H, kapacitansens μF och resistansens Ω .

Simuleringsmodell av elnätet vid datorhaveriet



Figur C2. Den simulerade kretsens högspänningsnät.



Figur C3. Fortsättningen på kretsen i figur 1, LSP nätet.

Referenser

- [1] Brandskadeåret 2003, Svenska Brandförsvarsförbundet.
- [2] http://www.sp.se/electronics/services/emc/docs/generisk_standard.htm
- [3] God elkvalitet; Statens energimyndighet, 2003.
- [4] Produktansvar För el; Svensk Energi, 1996.
- [5] Håkan Franzén, skadeansvarig Sak, Folksam.
- [6] Electrical Transients in Power Systems; Allan Greenwood, John Wiley and Sons, Inc., 1991, ISBN 0-471-62058-0.
- [7] Power System Analysis and design; J. Duncan Glover and Mulukutla S. Sarma, Wadsworth Group, 2002, ISBN 0-534-95367-0.
- [8] Systemjordning; Sture Lindahl, Sydkraft driftavdelningen, 1986.
- [9] Short-circuit tests on current-limiting fuses: modelling of the test circuit; R. Wilkins PhD, Ceng, FIEE, T. Saengsuwan MSc and L. O'Shields, BSEE, IEE proceedings-c, vol. 140, No. 1, Januari 1993.
- [10] Marcus Pirsko, Nexans IKO Sweden AB, Kraftkabeldivisionen
- [11] Svensk Standard SS 421 18 11, Spänningsgodhet för allmän distribution.
- [12] Förordning (1993:1067) om elektromagnetisk kompatibilitet
- [13] Ellagen (1997:857)
- [14] Electric Fuses; A. Wright and P.G. Newbery, IEE Power Engineering Series 2, 1984, ISBN 0-906048-78-8.
- [15] www.reo.co.uk/guides, Testing and measurement techniques-Surge immunity test