

CHALMERS



Vakuumbrytare i småskaliga Vattenkraftstationer

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Elektroteknik

A. BJÖRN M. JANSSON

Institution för energi och miljö

Avdelning för elteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2009

Vakuumbrytare i småskaliga Vattenkraftstationer

A. BJÖRN M. JANSSON

Department of Energy and Environment
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Göteborg, Sweden 2009

Vakuumbrytare i småskaliga Vattenkraftstationer
A. BJÖRN M. JANSSON

© A. BJÖRN M. JANSSON, 2009.

Department of Energy and Environment
Division of Electric Power Engineering
Chalmers University of Technology
SE-412 96 Göteborg
Sweden
Telephone +46 (0)31-772 10 00

Chalmers Reproservice
Göteborg, Sweden 2009

Vacuum circuit breaker in small-scale hydropower stations

A. BJÖRN M. JANSSON

Department of Energy and Environment

Chalmers University of Technology

ABSTRACT

This master thesis has been performed at Vattenfall Power Consultant in Gothenburg and Trollhättan for Vattenfall Vattenkraft. In this report vacuum circuit breaker in small-scale hydropower stations with the rated power 4 MVA and below has been studied. Models of the stations are modeled and analyzed in PSCAD/EMTDC to study the high voltage transients that are created after current chopping with vacuum circuit breaker. Vacuum circuit breaker may chop the current before it reaches zero value, which means that high voltage transients can be created. The equipment of the stations can be destroyed by high voltage transients.

The purpose of this thesis is to examine the use of vacuum circuit breaker in small-scale hydropower stations and the risk for high voltage transients from current chopping.

According to the results there is a risk of high voltage transients after current chopping with small synchronous generators in stations with the operating voltages 0.4 kV and 3.6 kV. When the vacuum circuit breaker is placed on the high voltage side of the transformer the risk increases of high voltages transients and reignitions due to the low capacitance of the transformer.

The conclusions is that high voltage transients occurs when the vacuum circuit breaker chops the current at a high chopping level in stations where the synchronous generator rated power is low, high rated voltage and a small capacitance. The risks of high voltage transients in small-scale hydropower stations can be reduced with surge arrester, RC-circuits or protective capacitors.

The report is written in Swedish.

Keywords: vacuum circuit breaker, voltage transients, current chopping, hydropower stations

Vakuumbrytare i småskaliga Vattenkraftstationer
A. BJÖRN M. JANSSON
Department of Energy and Environment
Chalmers University of Technology

SAMMANFATTNING

Detta examensarbete har utförts på Vattenfall Power Consultant i Göteborg och Trollhättan för Vattenfall Vattenkraft. Rapporten syftar till att utvärdera de risker som kan uppstå vid strömbrytning med vakuumbrytare i småskaliga vattenkraftstationer där märkeffekten för generatoren är 4 MVA och därunder. Modeller av småskaliga vattenkraftstationer modelleras för att efterlika de verkliga stationerna. Modellerna analyseras i PSCAD/EMTDC för att studera i vilka stationer det bildas höga spänningstransienter efter strömbrytning med vakuumbrytare. Vakuumbrytare har den egenskapen att de kan bryta strömmen innan strömmens nollgenomgång vilket kan ge upphov till höga spänningstransienter som kan förstöra anslutna generatorer, transformatorer och andra apparater.

Syftet med detta examensarbete är att undersöka för vilka stationsutformningar vakuumbrytare kan orsaka höga spänningstransienter vid strömbrytning i småskaliga vattenkraftstationer.

Det resultat som framkom vid simuleringarna visar att vid driftspänningarna 0,4 kV och 3,6 kV bildades höga spänningstransienter, för små synkrongeneratorer, efter strömklippning med en hög klippström. När vakuumbrytaren placerades vid uppspänningssidan av transformatorn blev riskerna större för höga spänningstransienter och återtändningar på grund av att spänningstransienterna påverkades av transformatorns låga kapacitans.

Slutsatsen av resultatet är att höga spänningstransienter förekommer när synkrongeneratorns märkeffekt är liten, hög märkspänning, liten kapacitans samt när vakuumbrytaren klipper strömmen vid en hög klippström. Riskerna för höga spänningstransienter i småskaliga vattenkraftstationer kan minskas vid installation av ventilavledare, RC-kretsar eller skyddskondensatorer.

Nyckelord: vakuumbrytare, spänningstransienter, strömklippning, vattenkraftstationer

Förord

Examensarbetet har genomförts på Vattenfall Power Consultant i Göteborg, Trollhättan och Chalmers Tekniska Högskola i Göteborg under våren/hösten 2009.

Jag skulle först och främst vilja tacka min handledare Henrik Elfving på Vattenfall Power Consultant i Trollhättan för all värdefull hjälp med examensarbetet och tack till min sponsor Magnus Lövgren på Vattenfall Research and Development i Älvkarleby för ekonomiskt stöd vilket har gjort det möjligt att genomföra examensarbetet. Jag skulle även vilja tacka David Löfgren på Vattenfall Power Consultant i Göteborg, Tarik Abdulahovic på Chalmers för all hjälp med simuleringarna i PSCAD/EMTDC, min examinator Ola Carlson på Chalmers samt ett stort tack till min sambo Madelene Kilestad för all korrekturläsning och tålamod.

Innehållsförteckning

ABSTRACT	VI
SAMMANFATTNING	VII
Förord.....	IX
Innehållsförteckning	X
Förkortnings- och symbolförteckning	XIII
1 Introduktion.....	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Avgränsningar	1
1.4 Upplägg	2
2 Teori.....	3
2.1 Lågfrekventa spänningstransienter som förorsakas vid strömbrytning utan återtändning	3
2.1.1 Generellt fall vid strömbrytning	3
2.1.2 Strömklippning	3
2.1.3 Modeller för strömklippning	8
2.2 Högfrekventa spänningstransienter som förorsakas vid strömbrytning med återtändning.....	8
2.2.1 Multipla återtändningar och spänningsekalering	9
2.2.2 Virtuellt strömklippning	11
2.2.3 Brytning av högfrekventa strömmar.....	12
2.3 Vakuumbrytartechniken	13
2.3.1 Historia	13
2.3.2 Fördelar med vakuumbrytare	13
2.3.3 Vakuumbrytarens uppbyggnad.....	14
2.3.4 Spänningshållfasthet för vakuumbrytare	15
2.3.5 Vakuumljusbågen	17
2.3.6 Utformning av kontakterna i vakuumbrytaren	18
2.4 Olika typfall vid strömbrytning med vakuumbrytare	19
3 Modellering av vattenkraftstationerna.....	23
3.1 Översikt över antal stationer.....	23
3.2 PSCAD/EMTDC	24

3.3	Modellering av komponenter i vattenkraftstationerna.....	24
3.3.1	Transformatormodell.....	24
3.3.2	Vakuumbrytarmodell.....	25
3.3.3	Synkrogeneratormodell	25
3.3.4	Synkrogenerators kapacitans	26
3.3.5	Kabelmodell	27
3.3.6	Modell av det inkommande nätet	28
3.4	Beräkningar i PSCAD-modellerna	29
4	Simulering	30
4.1	Simulering av lågspänningsstationer	30
4.1.1	Driftspänning 0,4 kV	30
4.1.2	Driftspänning 0,66 kV	33
4.2	Simulering med driftspänningarna 3,6 kV och 5 kV	34
4.2.1	Driftspänning 3,6 kV	34
4.2.2	Driftspänning 5 kV	35
4.3	Simulering med vakuumbrytare vid uppspänningssidan av transformatorn	36
4.3.1	12/3,6 kV transformator	37
4.3.2	22/3,6 kV transformator	38
4.4	Simulering med standardbrytare.....	40
4.5	Simulering med åtgärder mot höga spänningar	41
4.5.1	Skydd med ventilavledare	41
4.5.2	Skydd med RC-krets.....	42
5	Teoretiska beräkningar vid strömklippning.....	44
6	Analys och diskussion	46
6.1	Analys av simuleringarna	46
6.1.1	Lågspänningsstationer	46
6.1.2	Stationer med driftspänningarna 3,6 kV och 5 kV	47
6.1.3	Stationer där vakuumbrytaren placeras vid uppspänningssidan av transformatorn	48
6.2	Förenklad teoretisk analys vid strömklippning	48
6.3	Stationsutformningar med risker för höga spänningar	49
6.4	Risktabeller.....	50
7	Slutsatser och rekommendationer	52

8	Framtida arbete	54
9	Referenser	55
10	Appendix	57
10.1	Appendix A	57
10.2	Appendix B.....	59
10.3	Appendix C.....	61
10.4	Appendix D	63
10.5	Appendix E.....	64
10.6	Appendix F.....	66

Förkortnings- och symbolförteckning

A	Ampere
AA	Arcing angle
AMF	Axial magnetic field
AT	Arcing time
C	Kapacitans
CrCu	Krom/koppar
CrBi	Krom/vismut
d	Avstånd
$\frac{di}{dt}$	Derivatan av strömmen i
$\frac{dV}{dt}$	Derivatan av spänningen V
$\frac{dQ}{dt}$	Derivatan av laddningen Q
ϵ_0	Permittivitet i vakuum
ϵ_r	Relativ permittivitet
Hz	Hertz
i	Ström
\hat{I}	Ström
I_b	Ström genom vakuumbrytare
I_{ch}	Klippström
k	Kilo = 10^3
k_a	Överspänningsfaktor
L	Induktans
p.u.	Per unit
Q	Laddning
R	Resistans
R_k	Kortslutningsresistans
rad	Radian
RMF	Radial magnetic field
s	Sekunder
S_k	Kortslutningseffekt
S_n	Märkeffekt
SF ₆	Svavelhexafluorid
t	Tid
t_{open}	Tiden när vakuumbrytarens kontakter separerar
TRV	Transient recovery voltage
U	Spänning
U_m	Spänning efter strömklippning
$U_{m\ fas}$	Fasspänning efter strömklippning

U_{max}	Maximal spänning
U_{max} hög klippström	Spänning efter en återtändning med hög klippström
U_n	Märkspänning
U_p	Fasspänningens värde vid strömklippning
U_w	Spänningshållfasthet
V	Volt
W_0	Energi lagrad i kapacitansen C
W_c	När all energi är lagrad i kapacitansen C
W_m	Magnetisk energi
X_k	Reaktans
X_{pu}	Reaktans i per unit
Z	Impedans
Z_k	Kortslutningsimpedans
Z_N	Impedans
ω	Vinkelfrekvens

1 Introduktion

Examensarbetet syftar till att utvärdera de risker som kan uppstå vid strömbrytning med vakuumbrytare i småskaliga vattenkraftstationer där märkeffekten för generatoren är 4 MVA och därunder. Modeller av småskaliga vattenkraftstationer med vakuumbrytare modelleras och anpassas för att efterlikna de verkliga stationerna. Modellerna simuleras i PSCAD/EMTDC för att studera den transienta spänningen som bildas efter strömbrytning med vakuumbrytare. De småskaliga vattenkraftstationerna delas in i risknivåer för att finna vilka stationer det finns risk för höga spänningar vid strömbrytning med vakuumbrytare.

1.1 Bakgrund

Det finns en önskan hos Vattenfall att använda vakuumbrytare av miljöskäl istället för SF₆-brytare vid ny- och ombyggnad av småskaliga vattenkraftstationer. SF₆ är en av växthusgaserna som finns med i kyotoprotokollet, därav är vakuumbrytare en bra ersättare av SF₆-brytare bland annat för att de inte innehåller någon miljöfarlig gas. Vakuumbrytare har dock den egenskapen att de kan bryta strömmen innan strömmens nollgenomgång (strömklippning) vilket kan ge upphov till höga spänningstransienter som kan förstöra anslutna generatorer, transformatorer och andra apparater. De höga spänningstransienterna kan orsaka återtändningar i vakuumbrytaren ifall spänningen överstiger vakuumbrytarens spänningshållfasthet. Det är också känt att storleken på effekten för generatoren påverkar och problemet ökar med mindre generatorer.

1.2 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att studera vakuumbrytare i småskaliga vattenkraftstationer och därmed klargöra för vilka stationsutformningar det finns risk för höga spänningar och återtändningar efter strömbrytning med vakuumbrytare. Detta för att få fram ett underlag för framtida beslut i investeringar av vakuumbryarteknik i småskaliga vattenkraftstationer samt att ge rekommendationer för framtida projekt.

1.3 Avgränsningar

Flera avgränsningar har gjorts i examensarbetet.

- Tillgången på information om de småskaliga vattenkraftstationerna har i vissa fall varit begränsad, på grund av vattenkraftstationernas ålder och att de inte

tillverkas i samma utsträckning längre, vilket har medfört begränsningar av synkrongeneratormodellen i PSCSAD. Data för kapacitansen för småskaliga synkrongeneratorer har inte gått att få fram, därför har uppskattningar av kapacitansen för synkrongeneratorer gjorts.

- Simuleringarna har genomförts med en synkrongenerator på grund av att det är den vanligaste utformningen av småskaliga vattenkraftstationer. En synkrongenerator ger också det värsta fallet med höga spänningar efter strömbrytning.
- Asynkrongeneratorer studeras inte på grund av att de inte är så vanligt förekommande i småskaliga vattenkraftstationer.
- Jordfel eller fasfel i eller vid synkrongeneratorm studeras inte på grund av att det inte är så vanligt förekommande vid drift.
- I huvudsak studeras lågfrekventa förlopp på grund av att återtändningar inte inträffar för de flesta fallen. De högfrekventa förloppen som inträffar efter återtändningar studeras således i mindre omfattning på grund att de inte inträffar lika frekvent.

1.4 Upplägg

Rapporten är uppdelad i olika delar. I den första delen av rapporten beskrivs teorin om vakuumbrytare. I denna del presenteras en litteraturstudie inom området för att ge läsaren en övergripande förståelse. I nästa del beskrivs modellerna och resultaten från simuleringarna av de småskaliga vattenkraftstationerna. Modellerna modifieras med hjälp av parametrar och komponenter för att passa syftet av examensarbetet. Därefter analyseras och diskuteras resultaten från simuleringarna för att sedan kunna dra slutsatser och rekommendationer av resultaten i analysen.

2 Teori

I det här kapitlet presenteras en litteraturstudie om spänningstransienter som förorsakas vid strömbrytning samt ett teoriavsnitt om vakuumbrytartechniken.

2.1 Lågfrekventa spänningstransienter som förorsakas vid strömbrytning utan återtändning

Vid strömbrytning utan återtändning bildas en transient överspänning. Den transienta överspänningen är lågfrekvent och dess frekvens beror på kretsens induktans och kapacitans på var sida om vakuumbrytaren, mer om detta i kapitel 2.1.2.

2.1.1 Generellt fall vid strömbrytning

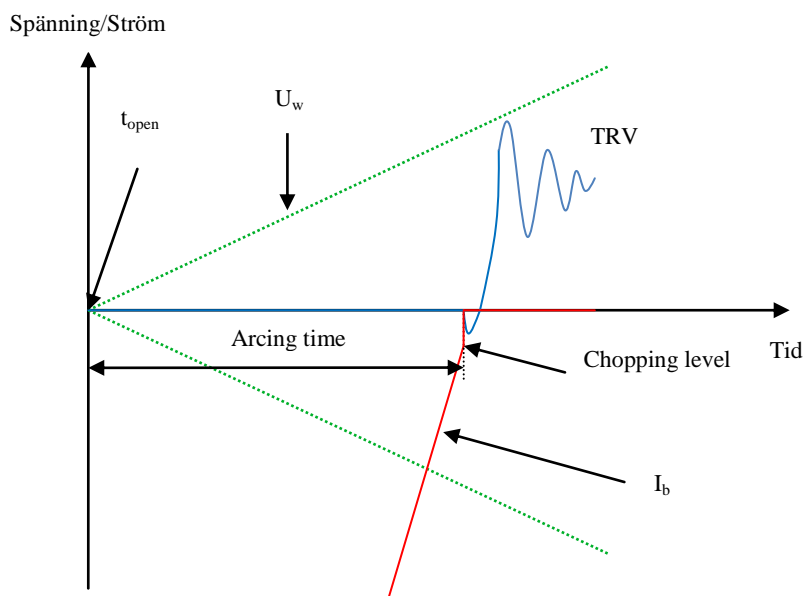
Om strömbrytning sker utan strömklippning i en kapacitiv krets när belastningsspänningen är maximal blir spänningen över kapacitansen konstant och spänningen över brytaren börjar oscillera. Detta ger att överspänningen över brytaren blir hög på grund av den höga spänningen över brytaren vid strömbrytning. Spänningen över kapacitansen ges av $V = Q/C$ där Q är laddningen, C är kapacitansen och derivatan av V är $dV/dt = 1/C \cdot dQ/dt = I/C$. För att åstadkomma en omedelbar spänningsförändring över kapacitansen krävs det att en oändlig ström börjar leda enligt ekvationen för derivatan av spänningen. Detta är inte sannolikt vilket medför att spänningen över kapacitansen inte kan ändras omedelbart, spänningen över kapacitansen blir konstant (Greenwood 1991, s. 2-3). På grund av den konstanta spänningen över kapacitansen får den oscillerande spänningen över brytaren en likspänningskomponent. Den oscillerande spänningen över brytaren börjar oscillera mellan 0 och 2 p.u. (Alexander & Dufournet 2008, s. 2-3).

Om strömbrytning sker i en RC-krets när belastningsspänningen är maximal kan den resulterande spänningen efter strömbrytning maximalt bli 2 p.u. utan någon dämpning. Den transienta spänningen bildas direkt efter strömbrytning för en ideal brytare på grund av att brytaren bryter strömmen vid strömnoll (Alexander & Dufournet 2008, s. 2-3).

2.1.2 Strömklippning

Strömklippning inträffar när brytaren klipper strömmen innan strömmens nollgenomgång, dessa strömmar är små induktiva och kapacitiva strömmar. Vid små strömmar är ljusbågen instabil, detta ger att ljusbågen klipps innan strömmen har korsat strömnoll. Värdet på strömmen då ljusbågen klipps kallas för strömklippning, så kallad current chopping, och punkten där det händer kallas för chopping level enligt Figur 2.1. Efter

att strömmen har klippts minskar strömmen med en väldigt brant lutning. Den branta lutningen på strömmen skapar en hög överspänning över den induktiva lasten. Lutningen på strömmen efter strömklippning och överspänningen är direkt proportionella mot strömmen vid strömklippning. Strömmen vid strömklippning är lägre om kontakterna öppnas nära strömnoll och större om kontakterna öppnas längre ifrån strömnoll. Vid stora strömmar inträffar inte strömklippning på grund av att ljusbågen är mer stabil i jämförelse med små strömmar, ljusbågen brinner till strömnoll vid stora strömmar (Abdulahovic 2009, s. 12-13).

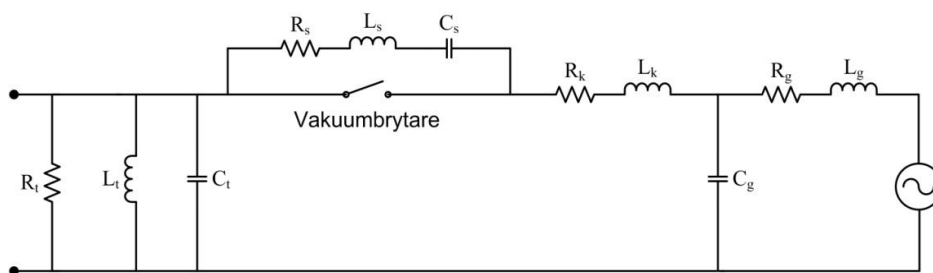


Figur 2.1 Spänningshållfastheten i en vakuumbrytare utan återtändning. U_w är spänningshållfastheten i vakuumbrytaren, TRV är den transienta överspänningen som bildas efter strömklippning och I_b är strömmen i vakuumbrytaren (Abdulahovic 2009, s. 13).

Tidsintervallet från det att kontakterna separerar till dess att strömklippning sker kallas för arcing time (AT) eller arcing angle (AA), vilket visas i Figur 2.1. Arcing time är alltså första ljusbågstiden innan strömklippning. Arcing time påverkar spänningshållfastheten i vakuumbrytaren, det vill säga vakuumbrytarens förmåga att motstå den transienta spänningen som bildas efter strömklippning. Om arcing time är liten blir spänningshållfastheten i vakuumbrytaren liten, på grund av att kontakterna i vakuumbrytaren inte har separerat så mycket ifrån varandra. Detta kan ge att överspänningen som bildas vid strömklippning blir större än spänningshållfastheten i vakuumbrytaren. I sådana fall sker en återtändning i vakuumbrytaren (Abdulahovic 2009, s. 12-13).

Efter strömklippning utan återtändning i vakuumbrytaren bildas en lågfrekvent transientöverspänning, den transienta överspänningen som uppstår kallas för transient recovery voltage, (TRV). TRV är spänningsskillnaden mellan vakuumbrytarens kontakter och dess frekvens beror på systemets LC-komponenter på var sida om

vakuumbrytaren. Om vakuumbrytaren är placerad mellan transformatorn och generatoren, bestäms den transienta spänningens frekvens av generator- och transformatorsidans LC parametrar. Generatorsidans frekvens bestäms av generatorns strökapacitans (C_g) och transienta induktans (L_g) och vid transformatorsidan bestäms den transienta spänningens frekvens av transformatorns induktans (L_t) och strökapacitans (C_t) enligt Figur 2.2. Den transienta spänningens frekvens är lågfrekvent, i storleksordning några kHz på båda sidorna. Frekvensen är oftast högre på transformatorsidan på grund av att transformatorns strökapacitanser är mindre än generatorns strökapacitanser (Glinkowski, Guierrez & Braun 1997, s. 222). Kretsen i Figur 2.2 består även av kabel (R_k , L_k och del av C_g) samt vakuumbrytare med dess strökomponenter (R_s , L_s och C_s).



Figur 2.2 En enkel krets bestående av transformator, vakuumbrytare med dess strökomponenter, kabel samt generator med dess komponenter.

Värdet på strömmen vid strömklippning beror till största del på materialvalet av kontakterna. Den beror även till viss del på vilken typ av last och impedansen av lasten som bryts enligt Abdulahovic (2009, s. 13). I den tidpunkt när strömklippning sker kan ekvation 2.1 för energin tecknas, där den magnetiska energin i induktanserna L omvandlas till elektrisk energi i kapacitanserna C när energin transporteras ifrån induktanserna till kapacitanserna vilket skapar en lågfrekvent transientspänning över vakuumbrytarens kontakter. Energin flyter fram och tillbaka mellan induktanserna och kapacitanserna och dämpas successivt av resistanserna som förluster (Rao & Gajjar 2006).

$$\frac{1}{2}LI_{ch}^2 = \frac{1}{2}CV^2 \quad (2.1)$$

Induktansen L kan tecknas med hjälp av ekvationerna 2.2, 2.3 och 2.4, där Z är generatorimpedansen, U_n är märkspänningen, S_n är generatorns märkeffekt och X_k är generatorns transienta reaktans. X_{pu} är den transienta reaktansen i per unit och ω är vinkelfrekvensen i radianer per sekund, dessa två parametrar är konstanta. Induktansen ökar med märkspänningen i kvadrat enligt ekvation 2.4 då konstant märkeffekt antas. Vid lägre märkeffekt på generatoren ökar induktansen linjärt och vid högre märkeffekt minskar induktansen linjärt enligt ekvation 2.4. Ur ekvationerna 2.1 och 2.4 kan den

transienta överspänningen V över vakuumbrytaren, som beror på klippströmmen vid strömbrytning, tecknas enligt ekvation 2.5. Överspänningen V är proportionell mot klippströmmen I_{ch} och impedansen $\sqrt{L/c}$ enligt ekvation 2.5, vilket ger en hög spänning vid en hög klippström. Kapacitansen i generatorn påverkar överspänningen enligt ekvation 2.5, vid ökande kapacitans minskar överspänningen med roten ur och minskande kapacitans ökar överspänningen med roten ur enligt ekvation 2.5. Summerat betyder det att en hög märkspänning, en låg märkeffekt, en låg kapacitans och en hög klippström ger en hög överspänning enligt ekvation 2.5 (Rao & Gajjar 2006). Den lågfrekventa transienta överspänningens frekvens kan beräknas enligt ekvation 2.6. Den lågfrekventa frekvensen efter strömklippning är systemets naturliga svängningsfrekvens och är i storleksordningen några kHz enligt Helmer och Lindmayer (1996, s. 328).

$$Z = \frac{U_n^2}{S_n} \quad (2.2)$$

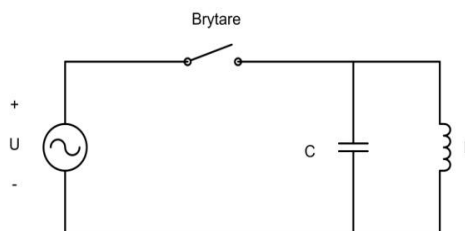
$$X_k = ZX_{pu} \quad (2.3)$$

$$L = \frac{X_k}{\omega} = \frac{U_n^2}{\omega S_n} X_{pu} \quad (2.4)$$

$$V = I_{ch} \sqrt{\frac{L}{C}} = I_{ch} U_n \sqrt{\frac{X_{pu}}{S_n \omega C}} \quad (2.5)$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.6)$$

Ekvationerna ovan beskriver överspänningen över vakuumbrytaren som bildas efter strömklippning och dess frekvens för en enfaskrets enligt Figur 2.3. Ekvationerna nedan beskriver den resulterande totala spänningen efter strömklippning, alltså driftspänningen och överspänningen, från en enkel enfaskrets enligt Figur 2.3.



Figur 2.3 Enfaskrets med brytare.

W_m i ekvation 2.7 är den magnetiska energin som är lagrad i induktansen L när strömklippning sker med klippströmmen I_{ch} . U_p är toppvärdet på fasspänningen över kapacitansen precis innan strömklippning sker där U är driftspänningen i ekvation 2.8.

W_0 i ekvation 2.9 är energin som lagras i kapacitansen C när strömklippning sker. Efter strömbrytning oscillerar den lagrade energin i induktansen och kapacitansen fram och tillbaka mellan induktansen och kapacitansen och dämpas samtidigt som en följd av förluster i kretsen. När all energi W_c är lagrad i kapacitansen C , enligt ekvation 2.10, blir fasspänningen $U_{m\ fas}$ maximal enligt ekvation 2.11. $U_{m\ fas}$ är således den totala fasspänningen som bildas efter strömklippning, alltså överspänningen som bildas vid strömbrytning och fasspänningen över kapacitansen enligt Figur 2.4. Den totala spänningen efter strömklippning, utan återtändning, när all energi är lagrad i kapacitansen C är U_m enligt ekvation 2.12. Överspänningsfaktorn, k_a , kan uttryckas med hjälp av ekvation 2.13 som ger toppvärdet på spänningen $U_{\max\ hög\ klippstr\ om}$ vid en hög klippström med en återtändning enligt ekvation 2.14. Flertalet återtändningar kan skapa väldigt höga spänningar vilket beskrivs mer i kapitel 2.2.1 (Popov 2002, s. 26-27; Roininen et al. 2009, s. 54-59).

$$W_m = \frac{1}{2} L I_{ch}^2 \quad (2.7)$$

$$U_p = \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (2.8)$$

$$W_0 = \frac{1}{2} C U_p^2 \quad (2.9)$$

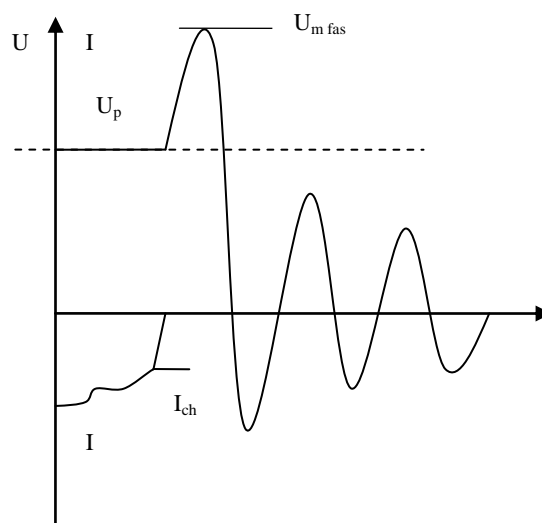
$$W_c = \frac{1}{2} C U_{m\ fas}^2 \quad (2.10)$$

$$W_c = W_0 + W_m \Rightarrow U_{m\ fas} = \sqrt{U_p^2 + \frac{L I_{ch}^2}{C}} \quad (2.11)$$

$$U_m = \sqrt{3} U_{m\ fas} \quad (2.12)$$

$$k_a = \frac{U_{m\ fas}}{U_p} = \sqrt{1 + \frac{L I_{ch}^2}{C U_p^2}} \quad (2.13)$$

$$U_{\max\ hög\ klippstr\ om} = (k_a + 2) U \sqrt{2} \quad (2.14)$$



Figur 2.4 Maximalspänning efter strömklippning (Roininen et al. 2009, s. 55)

2.1.3 Modeller för strömklippning

Två olika matematiska modeller finns för att beskriva strömklippning. Den första modellen beskrivs enligt ekvation 2.15:

$$I_{ch} = (\omega i \alpha \beta)^q \quad (2.15)$$

$$\alpha = 6,2 \cdot 10^{-16} \text{ (s)}$$

$$\beta = 14.3$$

$$q = (1 - \beta)^{-1} = -0.07518797$$

Där ω [rad/s] är vinkelfrekvensen, i är amplituden av belastningsströmmen, α , β och q är konstanter som beror på kontaktmaterialet CrCu. Klippströmmen I_{ch} i ekvation 2.15 varierar mellan 3 A och 8 A. Om belastningsströmmen är mindre än klippströmmen klipps belastningsströmmen på en gång enligt Helmer och Lindmayer (1996, s. 324).

Den andra modellen för strömklippning beskrivs av ekvation 2.16:

$$I_{ch} = a - b\hat{I} - c \log Z_N \quad (2.16)$$

$$Z_N = \sqrt{\frac{L}{c}} \quad (2.17)$$

Där a , b och c är konstanter som beror på kontaktmaterialet i vakuumbrytaren, Z_N är impedansen av kretsen som bryts enligt ekvation 2.17 och \hat{I} är amplituden av belastningsströmmen (Abdulahovic 2009, s. 14). Ekvation 2.16 gäller för belastningsströmmar från 45 A till 170 A enligt Popov (2002, s. 37). Vid en hög belastningsström minskar klippströmmen enligt ekvation 2.16 och vid en låg reaktiv effekt blir klippströmmen hög enligt ekvation 2.16 på grund av att belastningsströmmen är låg för det fallet.

2.2 Högfrekventa spänningstransienter som förorsakas vid strömbrytning med återtändning

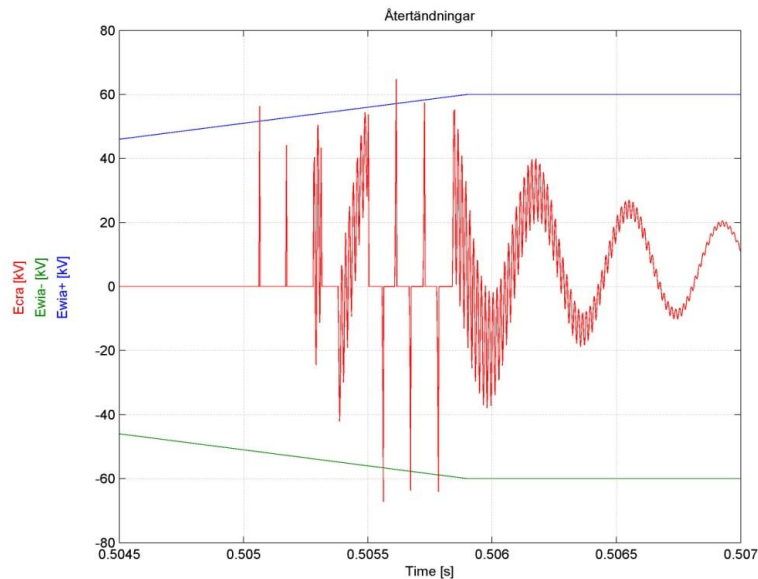
Vid återtändningar bildas högfrekventa strömmar och resulterande högfrekventa överspänningar. Dessa högfrekventa strömmar och överspänningar oscillerar i en annan del av kretsen i Figur 2.2 jämfört när strömklippning sker nära första strömnoll utan återtändning. Den högfrekventa strömmens frekvens bestäms i huvudsak av vakuumbrytarens strökomponenter (C_s och L_s) i Figur 2.2, vilket ger en frekvens i storleks-

ordning några MHz. Den högfrekventa transienta spänningen som bildas efter strömklippning av den högfrekventa strömmen har även den en hög frekvens som beror på vakuumbrytarens och närliggande strökomponenter (L_k , C_s och C_g) i Figur 2.2. Dess frekvens är också i storleksordningen några MHz (Helmer & Lindmayer 1996, s. 327-328).

2.2.1 Multipla återtändningar och spänningsskalering

Återtändning inträffar när spänningen mellan vakuumbrytarens kontakter överstiger spänningshållfastheten mellan kontakterna. Återtändning i vakuumbrytaren kan beskrivas med ett antal steg:

- 1) Först separerar kontakterna i vakuumbrytaren, detta händer på en slumpvis punkt på 50 Hz strömvågen. En ljusbåge framträder mellan kontakterna som fortsätter att leda strömmen tills strömnollgenomgång. När strömmen blir noll eller strax innan noll bryts ljusbågen mellan kontakterna genom strömklippning.
- 2) När ljusbågen bryts börjar en tävling mellan spänningshållfastheten i vakuumbrytaren och spänningen mellan kontakterna i vakuumbrytaren. Spänningen mellan kontakterna kallas för transient recovery voltage, TRV. TRV beror på vakuumbrytarens och ledningens strökomponenter på var sida om vakuumbrytaren.
- 3) Om TRV blir större än spänningshållfastheten mellan kontakterna inträffar en återtändning, denna återtändning skapar en högfrekvent transientström mellan kontakterna. Den högfrekventa strömmen bildas genom att energi oscillerar ifrån vakuumbrytarens strökomponenter från kapacitansen till induktansen i Figur 2.2 och spänningsskillnaden mellan kontakterna blir noll när den högfrekventa strömmen leder. När induktansen är liten och kapacitansen är stor blir frekvensen på den oscillerande strömmen hög. Strömmen mellan kontakterna bryts före nästa strömnoll när dess frekvens och amplitud har minskat.
- 4) Om ljusbågen släcks ut igen börjar tävlingen ännu en gång mellan TRV och spänningshållfastheten i vakuumbrytaren. Det här kan upprepas ett antal gånger enligt Figur 2.5, vilket kallas multipla återtändningar, tills spänningshållfastheten når ett högre värde än TRV eller om vakuumbrytaren misslyckas att bryta den högfrekventa strömmen (Telander, Wilhelm & Stump 1988, s. 554-556).



Figur 2.5 Återtändningar i en vakuumbrytare när spänningen över vakuumbrytaren överstiger spänningshållfastheten. Den blåa och gröna linjen (Ewia+, Ewia-) är spänningshållfastheten i vakuumbrytaren och den röda kurvan (Ecra) är spänningen mellan vakuumbrytarens kontakter (TRV).

Vid återtändningar finns det flera saker som kan förhindra att multipla återtändningar sker. Spänningshållfastheten i vakuumbrytaren kan ha en stor fördel mot TRV innan strömklippning sker, kontakterna kan redan vara isär när strömklippning sker. I sådana fall når spänningshållfastheten ett högt värde snabbt och TRV har svårt att hinna i kapp (Telander, Wilhelm & Stump 1988, s. 554-556). Kort arcing time, alltså tiden från det att kontakterna i vakuumbrytaren separerar tills strömklippning sker, leder till att vakuumbrytarens spänningshållfasthet inte hinner byggas upp tillräckligt mycket. Mindre än 100 μ s arcing time är inte önskvärt på grund av att spänningshållfastheten inte hinner byggas upp tillräckligt mycket för att motstå TRV, detta kan leda till återtändning. Arcing time större än 100 μ s är önskvärt, i så fall hinner vakuumbrytaren bygga upp en hög spänningshållfasthet som bättre kan motstå TRV (Glinkowski, Guierrez & Braun 1997, s. 219-221). Vakuumbrytaren bygger upp högre spänningshållfasthet vid separation mellan kontakterna under tiden återtändningar pågår, vilket innebär att det blir mindre risk för att återtändningar skall fortsätta att ske på grund av vakuumbrytarens ökande spänningshållfasthet. När TRV:s amplitud blir större och återtändning sker blir den transienta strömmens amplitud större vid större avstånd mellan kontakterna enligt Abdulahovic (2009, s. 17). Detta leder till att strömmen blir svårare att bryta för vakuumbrytaren.

Om strömmen som skall brytas är större än cirka 600 A kan inte vakuumbrytaren släcka ut ljusbågen vid första strömnollgenomgång på grund av att ljusbågen är stabil, vilket ger en låg klippström vid en hög ström enligt ekvation 2.16. Vakuumbrytaren måste vänta tills nästa strömnoll för att kunna släcka ljusbågen. Då har kontakterna i vakuumbrytaren separerat så mycket ifrån varandra att återtändning inte är sannolikt på grund av den höga spänningshållfastheten som har byggts upp i vakuumbrytaren. Om

frekvensen på den första TRV blir för hög kan inte vakuumbrytaren bryta den högfrekventa TRV och belastningsströmmen fortsätter att leda. Ljusbågen släcks inte förrän nästa strömnoll, då är spänningshållfastheten mellan kontakterna hög vilket kan förhindra en ny återtändning. Detta leder till att risk för återtändningar föreligger om följande villkor är uppfyllda enligt Telander, Wilhelm och Stump (1988, s. 554-556):

- TRV måste öka snabbare än spänningshållfastheten mellan kontakterna.
- TRV får inte öka för snabbt eftersom vakuumbrytaren måste kunna släcka ljusbågen för den första 50 Hz strömmen.
- Strömmen som skall brytas måste vara mindre än cirka 600 A.
- Arcing time skall vara mindre än 100 μ s.

Om alla dessa villkor är uppfyllda är det sannolikt att multipla återtändningar inträffar. Multipla återtändningar kan leda till spänningsskalering. TRV adderas med belastningsspänningen när strömklippning sker av induktiva strömmar vilket ger en hög spänning. Vid återkommande återtändningar kan spänningen öka mer och mer, vilket leder till spänningsskalering. För att motverka uppkomsten av spänningsskalering är det önskvärt att vakuumbrytare bland annat inte skall bryta ljusbågen för snabbt, arcing time skall inte vara mindre än 100 μ s. Normalt går det dock inte att påverka arcing time, det är slumpartade förlopp. Fler sätt att motverka uppkomsten av spänningsskalering är att undvika att villkoren i punktlistan ovan uppfylls (Abdulahovic 2009, s. 20). Återtändningar behöver dock inte betyda att det blir risk för höga spänningar. Återtändningar kan också verka som skydd mot höga spänningar ifall en återtändning sker när vakuumbrytarens kontakter separerar. I så fall begränsas överspänningen vilket kan ge en relativt låg total spänning.

2.2.2 Virtuellt strömklippning

Virtuellt strömklippning kan inträffa när återtändningar sker på en fas i ett trefasssystem, det skapas då en högfrekvent ström som induceras i de andra två faserna. De andra två faserna leder samtidigt belastningsströmmen. Om amplituden av den högfrekventa strömmen i de två faserna blir lika stor som amplituden av belastningsströmmen, skapar summan av de båda strömmarna artificiella strömnollgenomgångar. Vakuumbrytaren klarar av att bryta mycket höga strömmar, vakuumbrytaren kan då bryta strömmen vid sitt artificiella strömnoll. Artificiella strömnoll kan vara maximum av belastningsströmmen vilket ger att strömbrytningen kan inträffa vid maximalström. Till skillnad från normal strömklippning kan virtuellt strömklippning skapa höga teoretiska värden på spänningstransienterna, 60 – 70 p.u. Sannolikheten för att virtuellt strömklippning ska inträffa är inte stor, men när det inträffar kan skadorna bli omfattande. Det går att förhindra virtuellt strömklippning genom att motverka att multipla återtändningar sker. Det motverkas med begränsning av amplituden på spänningstransienterna som bildas

vid återtändningar, till exempel med ventilavledare (Telander, Wilhelm & Stump 1988, s. 557).

2.2.3 Brytning av högfrekventa strömmar

Efter återtändningar i vakuumbrytaren bildas högfrekventa strömmar. Den högfrekventa strömmens amplitud adderas med belastningsströmmens amplitud och den högfrekventa strömmens amplitud dämpas därefter ganska fort. Överslag mellan kontaktorna i vakuumbrytaren är av stokastisk natur. För samma vakuumbrytare kan förmågan att bryta högfrekventa strömmar variera från gång till gång. Skillnaden varierar med en normalfördelning med 15 % standardavvikelse (Abdulahovic 2009, s. 14-15).

Vakuumbrytarens förmåga att bryta högfrekventa strömmar kan beskrivas med ekvation 2.18. Ekvationen 2.18 ger ett värde på derivatan av strömmen som visar om vakuumbrytaren kan släcka den högfrekventa strömmen efter återtändningar. Vakuumbrytaren kan inte bryta strömmar med för höga di/dt vid strömnoll. Amplituden på den högfrekventa strömmen och di/dt minskar med tiden, efter ett antal strömnollgenomgångar är di/dt litet nog för att vakuumbrytaren skall klara av att bryta strömmen. Vakuumbrytare kan bryta strömmar med höga di/dt , med typiska värden 150 – 1000 A/ μ s enligt Wong, Snider och Lo (2003). Förmågan att släcka ut hög-frekventa strömmar i vakuumbrytare kan vara ett konstantvärde eller en funktion av tiden som beskrivs av den linjära ekvationen 2.18 enligt Glinkowski, Guierrez och Braun (1997, s. 220). Ekvation 2.18 ger ett medelvärde på förmågan att släcka ut högfrekventa strömmar i vakuumbrytaren.

$$\frac{di}{dt} = C(t - t_{open}) + D \quad (2.18)$$

Där di/dt är derivatan av strömmen vid strömnoll och t_{open} är tiden då kontaktorna separerar. C och D är konstanter, i Tabell 2.1 finns värden på konstanterna för olika spänningshållfastheter. Ljusbågen släcks när di/dt för ljusbågen har blivit mindre än vakuumbrytarens di/dt (Glinkowski, Guierrez & Braun 1997, s. 221).

Tabell 2.1 Konstanter till ekvation 2.18, förmågan att släcka ut högfrekventa strömmar.

Spänningshållfasthet	C (A / μ s ²)	D (A / μ s)
Hög	-0,034	255
Mellan	0,31	155
Låg	1	190

2.3 Vakuumbryartekniken

I det här kapitlet beskrivs allmän teori och historia om vakuumbryartekniken.

2.3.1 Historia

Den avgörande utvecklingen av vakuumbryartekniken gjordes av R. Sorensen och H. Mendelhall vid California Institute of Technology där de lyckades bryta strömmar upp till 900 A vid 40 kV utan större avsmältning av material från kontakterna och detta offentliggjordes 1926 i en rapport. Under 1950-talet introducerades den första kommersiella brytaren av Jennings. 1961 hade Jennings tio stycken olika vakuumbrytare i produktion. 1952 påbörjade General Electric en satsning att utveckla vakuumbrytare. De utvecklade bland annat spiralkontakten som kontrollerar vakuumljusbågen (Slade 2008, s. 2f). En annan viktig del som utvecklades var en skärm som täcker och skyddar vakuulkammaren från restprodukter ifrån vakuumljusbågen när en ström bryts (Svensson 2003, s. 5).

Den första kommersiella vakuumbrytaren för mellanspänningsnivån producerades år 1962 av General Electric Company (Garzon 2002). Utveckling gick framåt under 1960-talet, företag i U.S.A, Europa och Japan påbörjade sin utveckling av vakuumbrytare. 1967 lyckades Associated Electrical Industries i Storbritannien tillverka vakuumbrytare för 132 kV, 15,3 kA med åtta stycken vakuumflaskor kopplade i serie (Slade 2008, s. 2f). De följande årtionden 1970- och 1980 talen fick vakuumbrytaren stor spridning på grund av att de stora tillverkarna ABB och Siemens insåg fördelarna med vakuumbrytare och utvecklingen gick framåt. Detta gjorde att vakuumbrytaren etablerades i mellanspänningsnäten (Svensson 2003, s. 5). I dagens elnät används det främst vakuumbrytare för mellanspänningsnivån och SF₆-brytare för mellan- och högspänningsnivån (Abdulahovic 2009, s. 11).

2.3.2 Fördelar med vakuumbrytare

Vakuumbrytare har en rad fördelar:

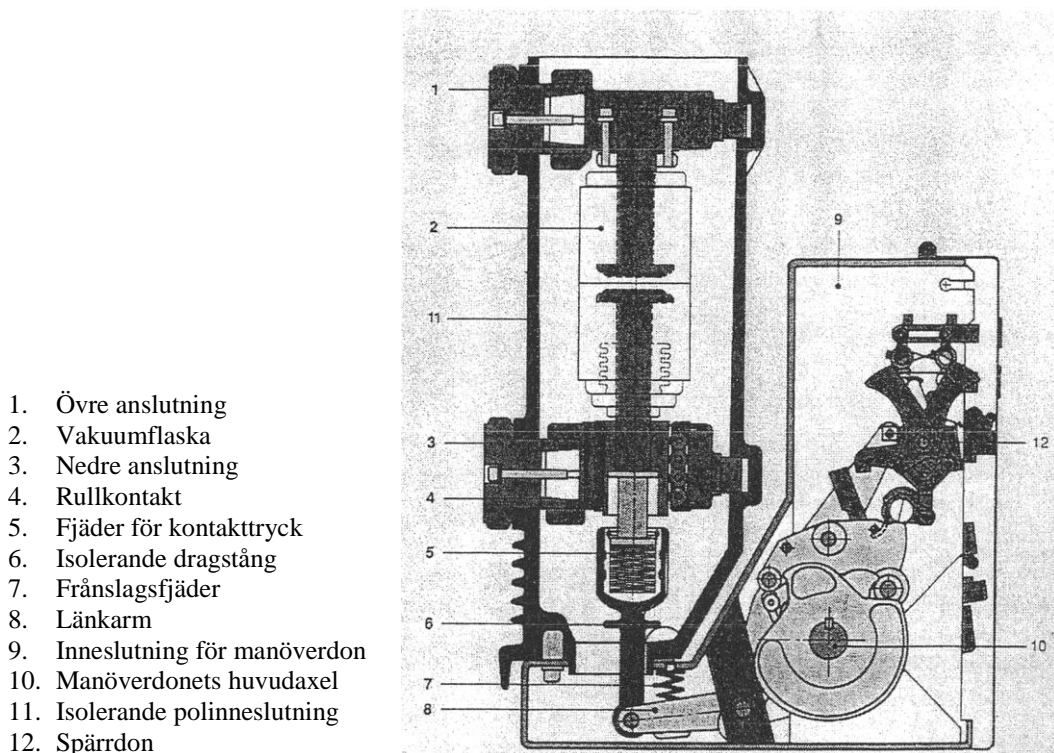
- Kontakterna behöver ingen service under vakuumbrytarens livstid.
- Vakuumbrytaren klarar höga spänningar med litet kontaktavstånd.
- Kan användas vid tuffa förhållanden. Påverkas inte av temperatur, smuts, luftfuktighet eller lufttryck.
- Det behövs ingen släckningsgas för att bryta strömmar, vilket betyder att ingen gas behöver fyllas på som för SF₆-brytare.
- Det behövs lite mekanisk energi för att bryta strömmar. Vilket beror på det korta kontaktavståndet mellan kontakterna som behövs för att bryta strömmar.

- Brytaren är kapabel att bryta strömmar med snabba transienter med höga di/dt .
- Vakuumbrytaren är miljövänlig på grund av att den inte innehåller någon miljöfarlig gas som SF₆-brytaren.
- Den opererar tyst.

SF₆ är en potentiell växthuseffektgas som påverkar miljön, den har enligt U.S. Environmental Protection Agency (EPA) 23 900 gånger större effekt än koldioxid (Slade 2008, s 1f; Abdulahovic 2009, s. 11-12).

2.3.3 Vakuumbrytarens uppbyggnad

En skiss över genomskärningen av en vakuumbrytare med dess beståndsdelar enligt Figur 2.6.

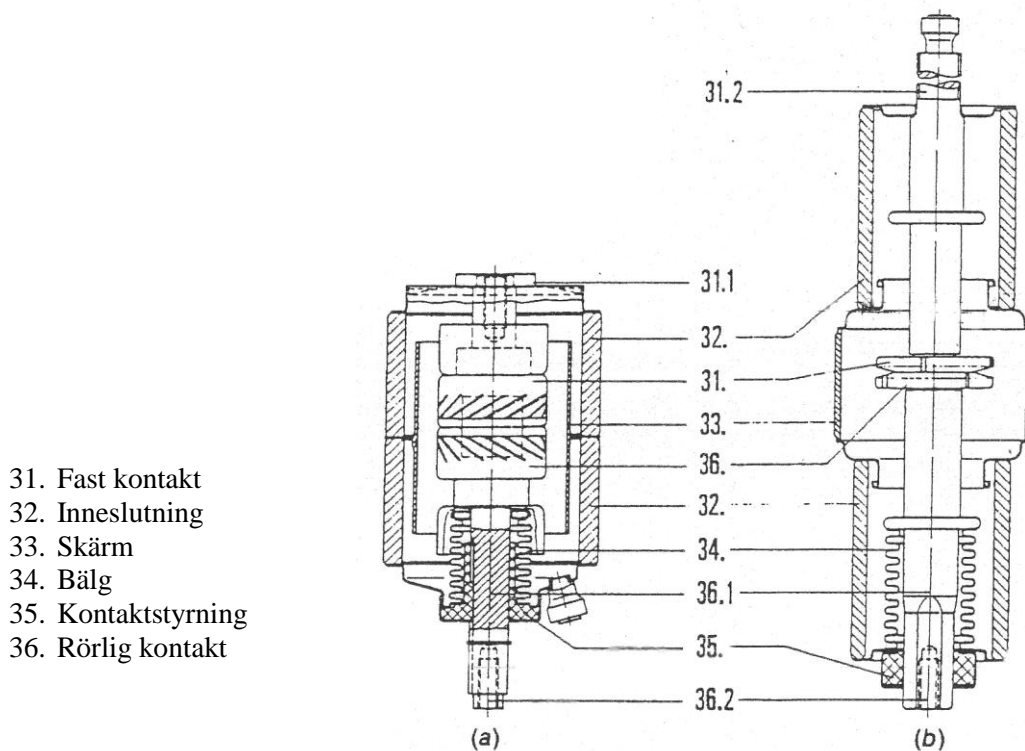


1. Övre anslutning
2. Vakuumflaska
3. Nedre anslutning
4. Rullkontakt
5. Fjäder för kontaktryck
6. Isolerande dragstång
7. Frånslagsfjäder
8. Länkarm
9. Inneslutning för manöverdon
10. Manöverdonets huvudaxel
11. Isolerande polinneslutning
12. Spärrdon

Figur 2.6 En komplett vakuumbrytare med dess beståndsdelar i genomskärning (Sölver 2000, s. 6).

Vakuumbrytaren är enkelt uppbyggd vilket visas i Figur 2.6. Den viktigaste delen i vakuumbrytaren är brytkammaren som kallas vakuumflaskan. Vakuumflaskan är helt vakuumsätt behållare och tillverkas av keramik. I vakuumflaskan sitter två stycken platta kontakter som dras isär när vakuumbrytaren bryter en ström (Nordin 2006, s. 5). Den ena kontakten sitter fast i brytkammaren medan den andra kontakten är rörlig och kan röra sig fram och tillbaka mot den andra kontakten. Den rörliga kontakten bevarar god

tätning med en flexibel metallbälg, vilket visas i Figur 2.7, för att behålla god kvalitet på vakuomet (Sölver 2000, s. 4). Materialet på kontaktarna har stor betydelse för att få en låg klippström, mer information om det i kapitel 2.3.6. En metallskärm skyddar brytkammarens väggar vid sidan om kontaktarna, vilket visas i Figur 2.7, och tar upp metallånga som kan bildas när vakuumbrytaren bryter strömmar, annars kan metallångan ifrån kontaktarna fastna på väggarna i brytkammaren. Detta kan leda till att väggarna blir ledande (Garzon 2002). Kontaktavståndet mellan kontaktarna är enligt Nordin (2006 s. 5) endast 8 – 12 mm när en ström bryts vid 10 kV. Kontaktarna i vakuumbrytaren hålls ihop i tillslutet läge med hjälp av en fjäder för att få ett högt kontakttryck. Manöverenergin som krävs för kontaktrörelse är liten på grund av att vakuumbrytarens delar är lätta och kontaktrörelsen som krävs vid strömbrytning är kort. Två olika typer av brytkammare för vakuumbrytare visas i Figur 2.7, den ena brytkammaren har inbyggd skärm och den andra har exponerad skärm.

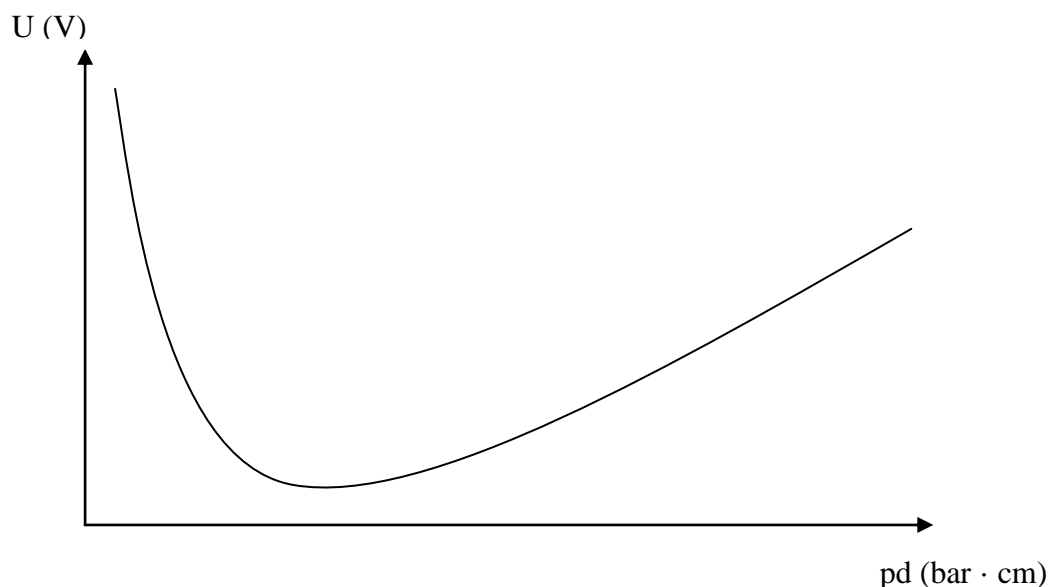


Figur 2.7 Vakuumbrytkammare: (a) inbyggd skärm, (b) exponerad skärm (Sölver 2000, s. 5)

2.3.4 Spänningshållfasthet för vakuumbrytare

Spänningshållfastheten för vakuumbrytaren kan beskrivas med Paschenkurvan, som beror på överslagsspänningen som funktion av tryck och avstånd. Vid högt tryck och ökande avstånd mellan kontaktarna ökar spänningshållfastheten enligt Figur 2.8.

Spänningshållfastheten minskar när trycket och avståndet minskar till ett minimivärde. Minimivärdet inträffar när trycket och avståndet är tillräckligt litet så att elektronerna kan bygga upp tillräcklig energi genom att de kan färdas relativt lätt och framkalla en effektiv jonisering. Trycket och avståndet är samtidigt tillräckligt stort för att tillräckligt många elektroner kan bilda ett överslag mellan kontakterna. Vid lågt tryck som i vakuum erhålls hög spänningshållfasthet vilket beror på att det finns få fria elektroner som kan jonisera molekylerna, spänningshållfastheten beror på kontakternas ytor och renhet i materialet. Vakuumbrytare når inte upp till den teoretiska spänningshållfastheten för vakuum eftersom kontakterna i vakuumbrytaren påverkas, kontakterna är inte helt jämna och material nöts bort då vakuumbrytaren använts. Vid större avstånd mellan kontakterna i vakuumbrytaren ökar spänningshållfastheten endast lite vilket beror på att man rör sig till höger på Paschenkurvan från den vänstra sidan, dock i ett idealt fall får brytaren lägre spänningshållfasthet vid större kontaktavstånd jämfört med ett litet avstånd enligt Figur 2.8 (Sölver 2000, s. 6-7).



Figur 2.8 Paschenkurvan för överslagsspänningen U som funktion av tryck p och avstånd d .

Vakuumbrytaren bygger upp spänningshållfastheten snabbt vid strömbrytning. Spänningshållfastheten i vakuumbrytaren beror även på kontakternas hastighet vid separation. Oavsett typ av brytare är det viktigt att bygga upp en hög spänningshållfasthet snabbt för att förhindra genombrott mellan kontakterna. Redan vid mycket små avstånd mellan kontakterna bygger vakuumbrytaren upp en hög spänningshållfastheten snabbt. Spänningshållfastheten i vakuumbrytaren ökar inte linjärt med avståndet mellan kontakterna utan med roten ur, vilket är en nackdel för vakuumbrytaren. Detta innebär att vakuumbrytare inte kan användas för högre spänningar. För att kunna använda vakuumbrytare för högre spänningar krävs det att flera vakuumbrytare seriekopplas.

Detta leder till att vakuumtekniken klarar högre spänningar men priset blir högre. För andra sorters brytare är spänningshållfastheten oftast linjär med avstånd mellan kontakterna (Svensson 2003, s. 9).

Spänningshållfastheten mellan vakuumbrytarens kontakter kan beskrivas med ekvation 2.19. Ett linjärt förhållande mellan spänningshållfastheten och avståndet mellan kontakterna antas för transientanalys enligt ekvation 2.19. Ekvationen 2.19 ger ett medelvärde på spänningshållfastheten som har en normalfördelning med 15 % standardavvikelse (Abdulahovic 2009, s. 14-15).

$$U = A(t - t_{open}) + B \quad (2.19)$$

Där t_{open} är tiden då kontakterna separerar, A och B är konstanter. A bestämmer lutningen eller hastigheten på kontakterna vid separation och B är spänningshållfastheten i vakuumbrytare när kontakterna ska börja separera. Konstanterna A och B varierar för olika vakuumbrytare. I Tabell 2.2 finns det värden på dessa konstanter för olika spänningshållfastheter (Glinkowski, Guierrez & Braun 1997, s. 221).

Tabell 2.2 Konstanter till ekvationen 2.19, spänningshållfasthet i vakuumbrytare.

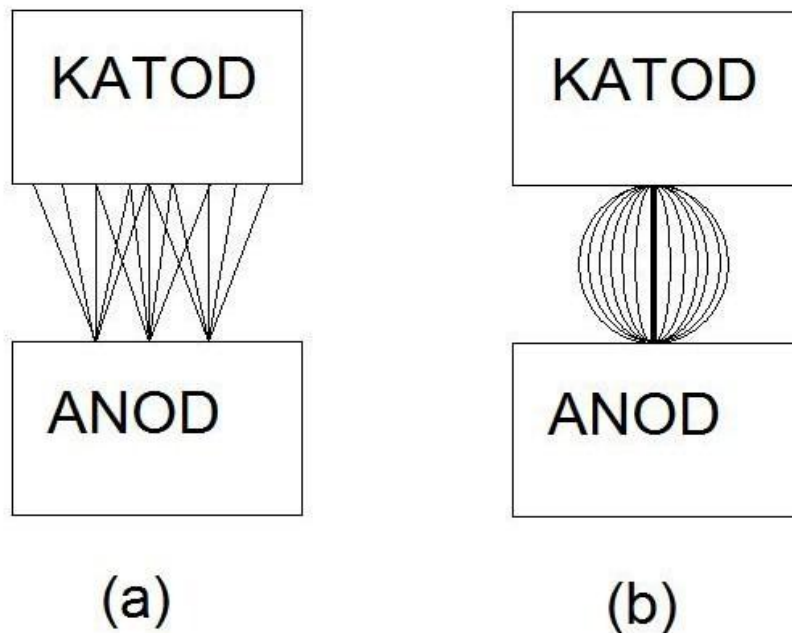
Spänningshållfasthet	A (V / μ s)	B (kV)
Hög	17	3,4
Mellan	13	0,69
Låg	4,7	0,69

2.3.5 Vakuumljusbågen

Ljusbågen brinner i ett plasma i vakuumbrytare som brinner till strömnollgenomgång. Plasmaget kommer ifrån kontaktmaterialet från kontakterna som förgasas och joniseras när en ljusbåge uppstår. I SF₆-brytare kommer plasmaget, där ljusbågen brinner, ifrån joniserad gas (Sölver 2000, s. 4).

Ljusbågen vid låg till måttlig ström kallas för diffus vakuumljusbåge och består av en eller flera katodfläckar som rör sig på den negativa kontakten enligt Figur 2.9. Varje katodfläck leder en ström på cirka 100 A. Katodfläckarna är starkt lysande punkter som rör sig över den negativa kontakten, vilket är ljusbågens fotpunkter. Katodfläckarna stöter bort varandra och antalet katodfläckar beror på strömmens storlek. Katodfläckar ökar i antal under första halvperioden av strömmen, avtar sedan under nästa halvperiod till noll vid strömnollgenomgång och strömmen bryts före nollgenomgången genom strömklippning. Den diffusa ljusbågen lyser svagt till skillnad på katodfläckarna som lyser starkt (Sölver 2000, s. 4).

Ljusbågen som bildas vid hög ström kallas för koncentrerad vakuumljusbåge. Då uppträder en stor fotpunkt på någon cm^2 som befinner sig på anoden och på katoden framträder katodpunkter inom ett begränsat område enligt Figur 2.9. Ljusbågen blir kraftigare och starkt lysande till skillnad ifrån diffus vakuumljusbåge som lyser svagt. Den kraftigare ljusbågen kan leda till omfattande avsmältning av material ifrån kontakterna, som stänk i form av droppar av metall kan lossna ifrån kontakterna och fastna i brytkammaren (Sölver 2000, s. 4).



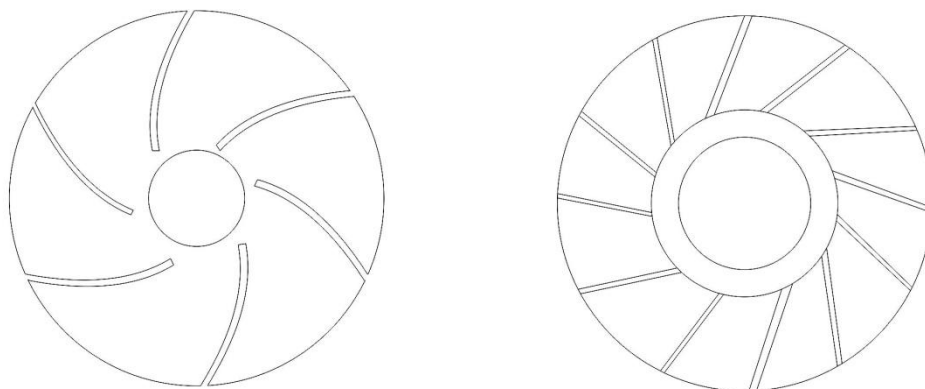
Figur 2.9 Vakuumljusbåge mellan kontakterna: (a) diffus vakuumljusbåge, (b) koncentrerad vakuumljusbåge

2.3.6 Utformning av kontakterna i vakuumbrytaren

Kontakterna i vakuumbrytaren är utformade för att få fotpunkterna att röra på sig när koncentrerad vakuumljusbåge uppstår. Avsmältning och stänk av material från kontakterna kan därigenom undvikas vilket resulterar till att den koncentrerade vakuumljusbågen återgår till diffus vakuumljusbåge (Sölver 2000, s. 5).

Det finns flera olika utformningar av vakuumbrytarens kontakter för att förhindra att metall smälter bort och skadar kontakterna. Dessa utformningar kan beskrivas med två olika tekniker, radial magnetic field (RMF) och axial magnetic field (AMF). Teknikerna går ut på att förhindra att ljusbågen koncentrerar sig på en punkt. Med RMF-tekniken, vilket visas i Figur 2.10, formges kontakterna så att en radiell magnetfältkomponent bildas. Den radiella magnetfältkomponenten får ljusbågen att utsättas för en tangentiellt riktad kraft som får ljusbågen att rotera på kontakterna. Detta hindrar avsmältning och

stänk av material på grund av att ljusbågen inte koncentreras till en punkt. Med AMF-tekniken rör sig inte ljusbågen, den axiella magnetfältkomponenten får den koncentrerande vakuumljusbågen att spridas ut över en större yta på kontakten. Detta förhindrar avsmältning av material ifrån kontaktarna vilket innebär att det koncentrerande tillståndet inte inträffar med det axiella fallet. Vakuumljusbågen sprids alltså ut över en större yta vilket betyder att vakuumljusbågen går tillbaka till det diffusa tillståndet fast med fler fotpunkter (Svensson 2003, s. 8).

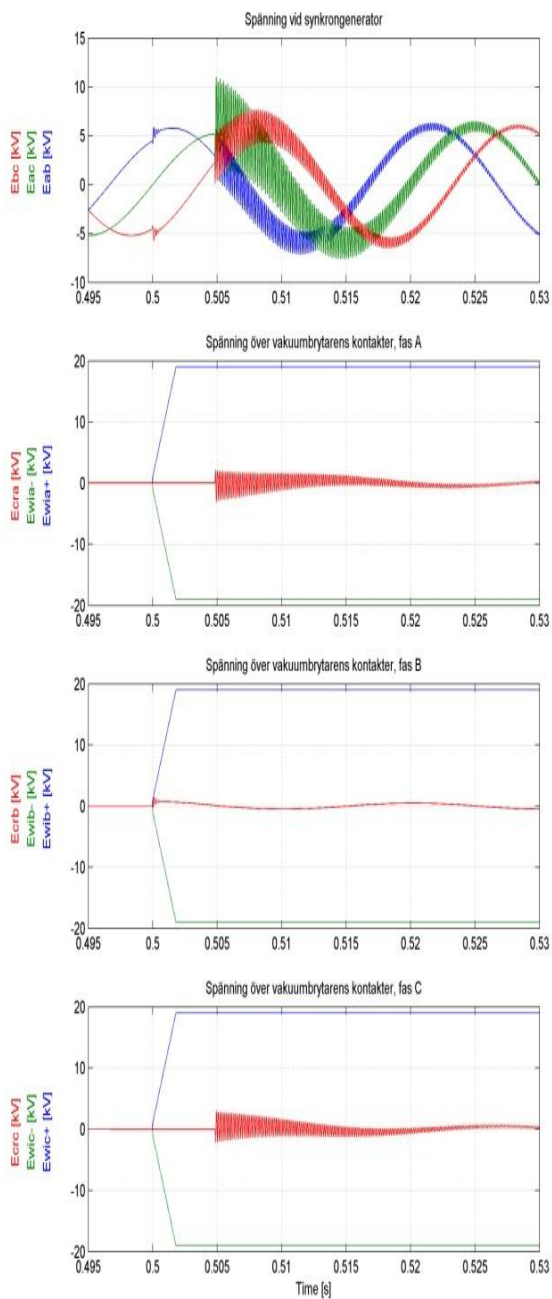


Figur 2.10 En skiss av utformning av vakuumbrytarens kontakter, figuren beskriver spiralkontakter enligt RMF-tekniken (Sölver 2000, s. 5).

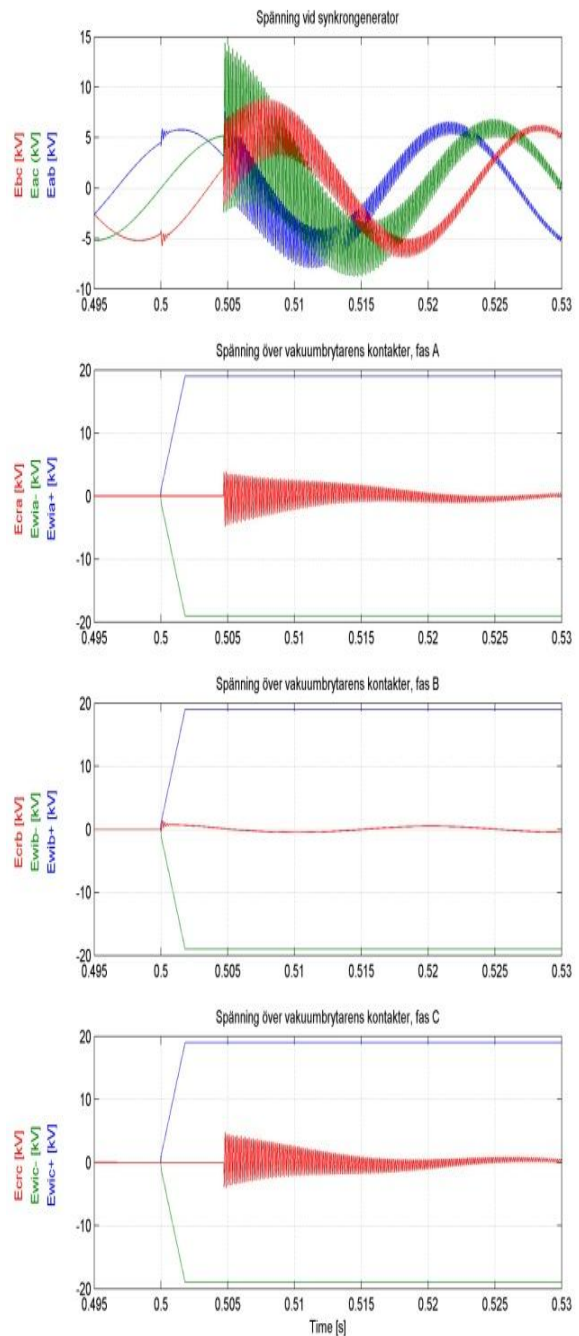
Vakuumbrytarens kontakter är oftast av legeringarna krom/koppar (CrCu) eller krom/vismut (CrBi). Dessa legeringar ger en låg klippningsström. Krom/koppar (CrCu) är den vanligaste förekommande legeringen för vakuumbrytarens kontakter. Då kan det maximala värdet på klippningsströmmen hållas nere till 4 – 5 A enligt Nordin (2006, s. 6).

2.4 Olika typfall vid strömbrytning med vakuumbrytare

Det finns flera olika riskfall som kan inträffa vid strömklippning med vakuumbrytare. I de fall när spänningen över vakuumbrytarens kontakter inte överstiger vakuumbrytarens spänningshållfasthet bildas en lågfrekvent spänningstransient över vakuumbrytarens kontakter. Ifall spänningstransienterna över vakuumbrytarens faser är låga efter strömklippning kan spänningen vid till exempel synkrogeneratorn bli mindre än den godkända spänningshållfastheten enligt Figur 2.11. Om spänningstransienterna över vakuumbrytarens kontakter är större efter strömklippning enligt Figur 2.12 än fallet i Figur 2.11, kan spänningen till exempel vid synkrogeneratorn bli större än den godkända spänningshållfastheten trots att det inte sker någon återtändning i vakuumbrytaren. Det betyder alltså att det inte behöver inträffa återtändningar i vakuumbrytaren för att spänningen skall överstiga systemets spänningshållfasthet.



Figur 2.11 Spänning över vakuumbrytarens kontakter och spänning vid synkrogenerator. Spänningen överstiger inte vakuumbrytarens spänningshållfasthet.



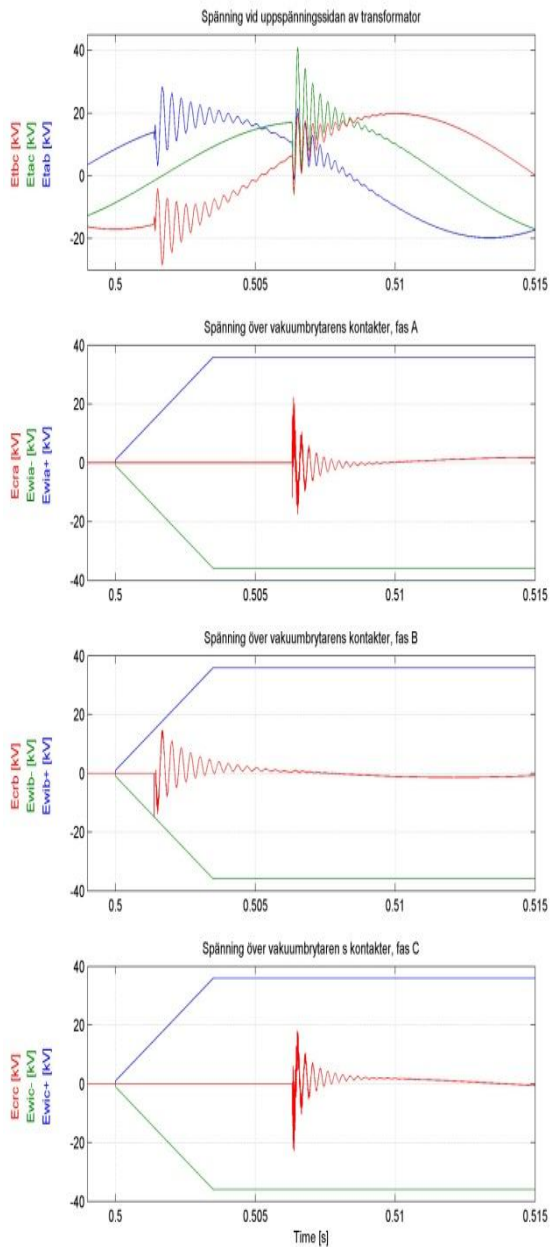
Figur 2.12 Spänning över vakuumbrytarens kontakter och spänning vid synkrogenerator. Spänningen överstiger inte vakuumbrytarens spänningshållfasthet.

Överspänningen som bildas efter strömklippning över vakuumbrytarens kontakter kan överstiga vakuumbrytarens spänningshållfasthet en gång vilket leder till en återtändning enligt Figur 2.13. Detta kan leda till att det blir risk att den resulterande spänningen vid till exempel synkrogeneratorm blir större än den godkända spänningshållfastheten

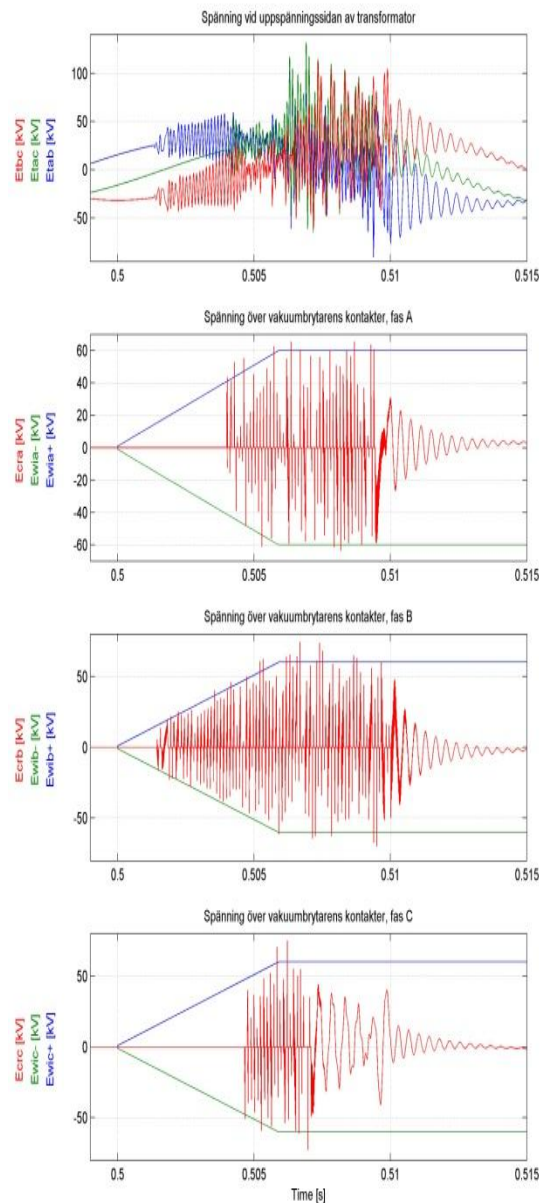
enligt Figur 2.13 jämfört med fallet utan återtändning. En återtändning betyder dock inte alltid att den resulterande spänningen vid till exempel synkrogeneratorn överstiger den godkända spänningshållfastheten, det beror också på när återtändningen inträffar mellan vakuumbrytarens kontakter och hur stor spänningen blir över vakuumbrytarens andra faser. Det är mindre risk för höga spänningar ifall en återtändning inträffar tidigt vid separation mellan vakuumbrytarens kontakter på grund av att spänningen över vakuumbrytarens kontakter inte blir så stor vid det fallet. Det är alltså större risk för höga spänningar ifall en återtändning inträffar senare när vakuumbrytaren har maximal spänningshållfasthet mellan kontakterna på grund av överspänningen blir större i detta fall.

När flera återtändningar inträffar i vakuumbrytaren bildas högfrekventa spänningar med hög amplitud enligt Figur 2.14. Vid flertalet återtändningar i vakuumbrytaren blir den resulterande spänningen vid till exempel synkrogeneratorn hög, detta kan leda till spänningsskalering. Flertalet återtändningar skall undvikas på grund av att virtuell strömklippning kan inträffa vilket kan ge väldigt höga spänningstransienter enligt kapitel 2.2.2. Återtändning i vakuumbrytaren kan också verka som ett skydd mot höga spänningar på grund av att överspänningen begränsas vid återtändning, överspänningen kan i så fall inte bli större än vakuumbrytarens spänningshållfasthet enligt fas B i Figur 2.13. Spänningarna blir dock höga över de andra två faserna i vakuumbrytaren enligt Figur 2.13. Vakuumbrytarens spänningshållfasthet kan dock vara högre än systemets spänningshållfasthet vilket betyder att det kan bli risk för höga spänningar ifall återtändningar inträffar vid full kontaktseparation enligt Figur 2.14.

Det kan också finnas risk för höga spänningar ifall överspänningen över vakuumbrytaren är låg eller knappt märkbar efter strömbrytning. Detta inträffar när spänningarna på båda sidorna av vakuumbrytaren är lika stora efter strömklippning. Om detta sker och om spänningarna på båda sidorna av vakuumbrytaren blir höga kan påfrestningarna bli stora på dessa sidor utan att det sker någon återtändning som begränsar spänningen. Det är således bättre skydd ifall spänningarna vid vakuumbrytarens sidor blir olika höga, alltså när en överspänning bildas över vakuumbrytaren, för att då kan det ske en återtändning som begränsar de höga spänningarna.



Figur 2.13 Spänning över vakuumbrytarens kontakter med en återtändning på fas B och de resulterande spänningarna.



Figur 2.14 Spänning över vakuumbrytarens kontakter med flera återtändningar på alla faserna och de resulterande spänningarna.

3 Modellering av vattenkraftstationerna

Vattenkraftstationerna som studeras är ett urval av Vattenfall Vattenkrafts småskaliga vattenkraftstationer vilket innebär att märkeffekten för generatoren är i storleksordningen 4 MVA och därunder. Driftspänningen varierar för de småskaliga vattenkraftstationerna från 0,4 kV upp till 5 kV. Stationen med driftspänningen 5 kV är en gammal station, cirka 100 år, vilket betyder att generatorerna kanske inte är konstruerade för konstruktionsspänningen 7,2 kV. Märkhållspänningarna för de olika konstruktionsspänningarna finns att studera i Tabell 3.1. Kort stötspänning kan variera och kan vara högre än de standardvärden som visas i Tabell 3.1. Utformningen av stationerna varierar, det finns stationer med en generator och andra stationer med flera generatorer. Brytaren för generatoren är oftast placerad vid nerspänningssidan av transformatorn, det gäller för 22 av 29 stationer enligt Tabell 3.2. De flesta stationerna har för närvarande luftisolerade effektbrytare eller vakuumbrytare enligt Relfsson¹. Två stycken figurer på typiska uppbyggnader av småskaliga vattenstationer visas i Appendix C.

Tabell 3.1 Konstruktionsspänning och märkhållspänning för olika spänningsnivåer enligt IEC-standard 60076-3.

Konstruktionsspänning [kV _{eff}]	Märkhållspänningar	
	Korttidsväxel- spänningsprov [kV _{eff}]	Kort stöt [kV̂]
1	3	-
3,6	10	40
7,2	20	60
12	28	75
24	50	125
36	70	170
52	95	250

3.1 Översikt över antal stationer

Antalet småskaliga vattenkraftstationer som på sikt skulle kunna byggas om med vakuumbrytare visas i Tabell 3.2 nedan. De 29 stationerna finns utsprida i Västra Götaland, Halland och Dalsland. Fem stycken av dessa stationer har brytare vid både upp- och nerspänningssidan av transformatorn. Dessa fem stationer behandlas som stationer med märkspänningen 0,4 kV i Tabell 3.2. Märkspänningen och driftspänningen för de olika stationerna är troligtvis ungefär samma, de skiljer sig nog inte så mycket ifrån varandra. Antalet generatorer per station med deras märkeffekter finns att studera i Appendix D.

¹ Dag Relfsson Vattenfall Vattenkraft, telefonsamtal den 6 oktober 2009.

Tabell 3.2 Antalet småskaliga vattenkraftstationer som kan byggas om med vakuumbrytare för olika spänningsnivåer, vissa av de småskaliga vattenkraftstationerna kan innehålla vakuumbrytare. Stationer där brytaren är placerad vid nerspänningssidan av transformatorn anges spänningarna vid denna sida och stationer där brytaren är placerad vid uppspänningssidan av transformatorn anges spänningarna vid denna sida.

Stationer där brytaren är placerad vid nerspänningssidan av transformatorn			Stationer där brytaren är placerad vid uppspänningssidan av transformatorn		
Konstruktions- spänning [kV]	Märkspänning [kV]	Antal stationer	Konstruktions- spänning [kV]	Märkspänning [kV]	Antal stationer
1	0,4	16	12	12	3
	0,66	4		11	1
3,6	3,3	1	24	22	1
7,2	5	1	52	40	1
				44	1
Summa antal stationer		22			7
Totalsumma antal stationer					29

3.2 PSCAD/EMTDC

Simuleringarna har utförts i PSCAD/EMTDC. Electromagnetic Transients including Direct Current (EMTDC) är simulationsmotorn där beräkningar genomförs vilket är den interna delen av det grafiska gränssnittet Power System Computer Aided Design (PSCAD) där modeller byggs upp. Programmet används främst för simuleringar av transienta fenomen. I programmet finns det bland annat färdiga modeller för generatorer, motorer, transformatorer, kablar och skydd med mera enligt PSCAD/EMTDC.

3.3 Modellering av komponenter i vattenkraftstationerna

Komponenterna i de småskaliga vattenkraftstationerna modelleras och dimensioneras med hjälp av befintliga modeller i PSCAD eller egenutvecklande modeller.

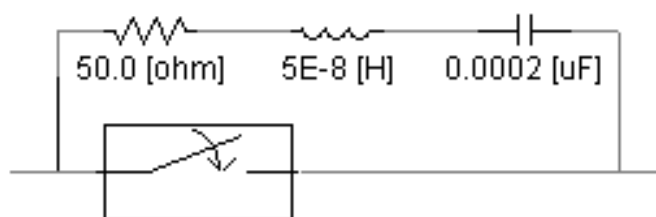
3.3.1 Transformatormodell

Transformatormodellen som används i simuleringarna är en trefastransformatormodell från PSCAD. Vid simuleringarna är transformatorn delta-Y-kopplad på grund av att det är den vanligaste kopplingen för de småskaliga vattenkraftstationerna. Inställningar av transformatorns parametrar i PSCAD finns i Appendix B, Figur 10.3 och Figur 10.4.

Transformatorns strökapacitanser dimensioneras utifrån de ungefärliga värdena på strökapacitanserna enligt J.C. Das (2003, s. 26). Värdet 5 nF används för strökapacitanserna, vilket antas vara representativt för de transformatorstorlekar som är aktuella.

3.3.2 Vakuumbrytarmodell

Vakuumbrytarmodellen som används är utvecklad av Tarik Abdulahovic på Chalmers. I Figur 3.1 visas modellen för vakuumbrytaren med dess strökomponenter en resistans (50 Ω), en kapacitans (200 pF) och en induktans (50 nH) (Helmer & Lindmayer 1996, s. 32). Vakuumbrytarmodellen infattar två modeller av strömklippning, båda modellerna beskrivs i kapitel 2.1.3. Konstant klippström användes vid simuleringarna för att få fram de värsta fallen. Använda inställningar för vakuumbrytarmodellen finns i Appendix B, Figur 10.5, Figur 10.6, Figur 10.7 och Figur 10.8 för detaljerad information för de olika spänningsnivåerna. Två stycken olika klippströmmar har använts vid simuleringarna 3 A och 5 A. Dessa klippströmmar är representativa för ny tillverkade vakuumbrytare enligt Breder². Spänningshållfastheten för vakuumbrytaren för de olika spänningsnivåerna har använts enligt angivna data från ny tillverkade vakuumbrytare. Hastigheten för uppbyggnaden av spänningshållfastheten och förmågan att bryta högfrekventa strömmar i vakuumbrytaren modelleras enligt kapitel 2.3.4 och 2.2.3.



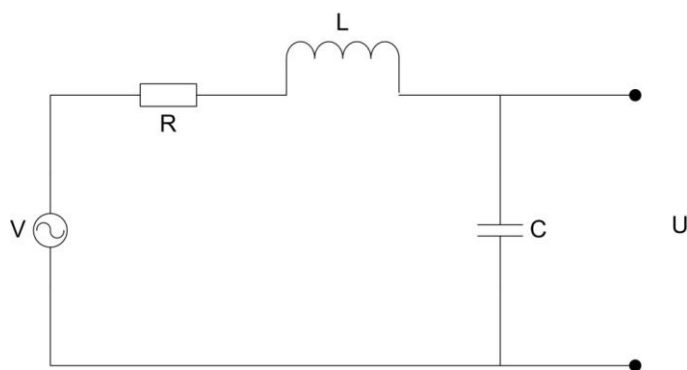
Figur 3.1 Modell av vakuumbrytare med dess strökomponenter (en resistans, en induktans och en kapacitans).

3.3.3 Synkrongeneratormodell

Synkrongeneratoren i PSCAD modelleras med hjälp av en spänningskälla med den interna spänningen V i serie med en resistans R , en induktans L och parallellkopplade strökapacitanser C . Spänningen U är spänningen ut ur synkrongeneratoren enligt Figur 3.2. I verkligheten är kapacitansen för synkrongeneratoren utspridd, dock ger placeringen av kapacitansen enligt Figur 3.2 ett värre fall på grund av kapacitansen koncentreras till ett ställe. Spänningskällan anpassas och ställs in så att önskad aktiv och reaktiv effekt fås ut beroende på effektfaktorn för synkrongeneratoren. Detta utförs genom att justera spänningen och vinkeln för spänningskällan. Den aktiva effekten ändras mestadels genom att ändra vinkeln och den reaktiva effekten ändras mestadels genom att ändra

² Henrik Breder ABB Corporate Research, telefonsamtal den 15 juni 2009.

spänningen för spänningskällan. Justeras vinkeln ändras även den reaktiva effekten något, på motsvarande sätt ändras den aktiva effekten något när spänningen justeras. Värdena för strökapacitanserna i synkrogeneratoren anpassas enligt kapitel 3.3.4. Resistansen och induktansen beräknas enligt ekvationer i Appendix A. Resistansen beräknas från statorförlusterna i synkrogeneratoren. Statorförlusterna antas vara två procent av den aktiva effekten enligt studier av befintliga småskaliga vattenkraftstationer. Induktansen beräknas från den transienta reaktansen i synkrogeneratoren som antas vara 0,30 p.u. av synkrogenerators reaktans. Den subtransienta reaktansen har typvärdet 0,20 p.u. av synkrogenerators reaktans, dock valdes den transienta reaktansen för att den ger ett något värre fall med en högre spänning efter strömbrytning än när den subtransienta reaktansen används enligt Appendix A (Kundur 1994, s. 184f).



Figur 3.2 Transientmodell av synkrogeneratoren, en spänningskälla V i serie med en resistans R , en induktans L och parallellkopplade strökapacitanser C för varje fas. U är spänningen ut ur synkrogeneratoren.

3.3.4 Synkrogenerators kapacitans

Data för småskaliga synkrogenerators kapacitans har inte gått att finna, antaganden har därför gjorts. Data för strökapacitanser för större synkrogenerators finns, antaganden har därför utgått ifrån data från Glinkowski, Guierrez och Brauns (1997, s. 222) artikel där strökapacitanser anges för synkrogenerators från 50 MVA och uppåt för mellanspänning. Från denna artikel kan vissa samband dras, en ökande märkeffekt och en lägre märkspänning för synkrogenerators ökar värdet på strökapacitanserna. Värdena på märkeffekterna för synkrogenerators som används i simuleringarna är mycket lägre än Glinkowski, Guierrez och Brauns värden, detta ger en stor osäkerhet på det faktiska värdet för strökapacitanserna i de småskaliga synkrogenerators. Enligt sambanden minskar värdet på synkrogenerators strökapacitanser för lägre märkeffekt, därför varierar synkrogenerators strökapacitanser från 5 nF till 200 nF i simuleringarna. Det värdet på strökapacitanserna som gav den högsta spänningen efter strömklippning har använts i simuleringarna för att få fram det värsta fallet som ger störst risker. Tabeller för de resulterande spänningarna då strökapacitansen varierar för de olika simuleringfallen finns att studera i Appendix E och Appendix F.

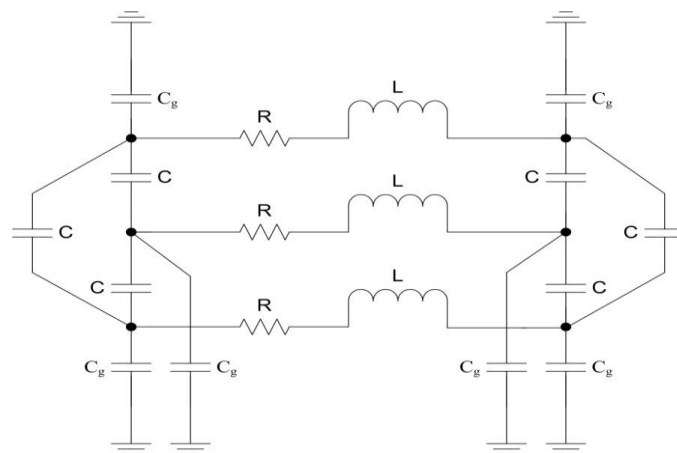
Kapacitansen för en plattkondensator kan studeras med ekvation 3.1.

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (3.1)$$

Ekvation 3.1 visar att större yta A ökar kapacitansen och större avstånd d minskar kapacitansen. Dessa samband kan studeras med Glinkowski, Guierrez och Brauns artikel (1997, s. 222), vilket påvisar att kapacitansen för synkrongeneratorer med lägre märkeffekt minskar på grund av att ytan är mindre för små synkrongeneratorer i jämförelse med stora synkrongeneratorer. På grund av att det finns en stor osäkerhet på värdet för kapacitanserna mellan faserna i synkrongeneratorn tas de inte med i simuleringarna. I de fall då kapacitanserna mellan faserna ändå har tagits med i simuleringarna har spänningen efter strömklippning minskats gentemot utan kapacitanser mellan faserna. Detta betyder att simuleringar utan kapacitanser mellan faserna i synkrongeneratorn ger högre spänningar som visar de värre fallen.

3.3.5 Kabelmodell

Kablarna i systemet modelleras med hjälp av en kabelmodell i PSCAD. Modellen som används är en trefas-pi-modell som visas i Figur 3.3. Inställningar i trefas-pi-modellen finns i Appendix B, Figur 10.1 och Figur 10.2. Längderna på kablarna antas vara 5 m mellan transformator och vakuumbrytare och 15 m mellan vakuumbrytare och synkrongenerator på grund av korta avstånd mellan utrustningen i de småskaliga vattenkraftstationerna. I det fall när vakuumbrytaren är placerad vid uppspänningssidan av transformatorn antas längderna av kablarna vara 5 m respektive 15 m mellan vakuumbrytare och transformator och mellan transformator och synkrongenerator.



Figur 3.3 Trefas-pi-modell av en trefaskabel. C är kapacitansen mellan faserna, C_g är kapacitansen till jord, R och L är resistansen och induktansen för varje fas.

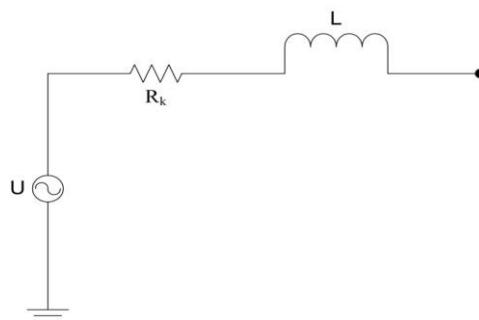
De korta längderna på kablarna påverkar inte simuleringarna nämnvärt för att kablarnas kapacitans per meter är låg, endast 5,31 pF per meter. Det betyder att 1000 meter kabel behövs för att kapacitansen i kablarna skall bli lika stor som synkrogenerators värsta fall 5 nF. Kablarnas påverkan, efter strömklippning utan återtändning, kan alltså uteslutas.

3.3.6 Modell av det inkommande nätet

Det inkommande nätet modelleras med en spänningskälla U i serie med en induktans L och en kortslutningsresistans R_k enligt Figur 3.4. Parametrarna beräknas med hjälp av den skenbara kortslutningseffekten som antas vara 50 MVA. 50 MVA är ett ganska lågt värde på nätets kortslutningseffekt, sannolikt kan den vara högre. För högre kortslutningseffekt minskar impedansen vilket ger lägre induktans och resistans för nätet enligt ekvation 3.3. Kortslutningseffekten 50 MVA kan alltså ses som ett värsta fall. Kortslutningseffekten har sannolikt inte så stor betydelse i simuleringarna när vakuumbrytaren placeras vid nerspänningssidan av transformatorn. Transformatorns kortslutningsimpedans är sannolikt stor i jämförelse med nätets impedans vilket innebär att transformatorn påverkar simuleringarna mer än det inkommande nätet. Induktansen L för nätet beräknas med hjälp av ekvationerna 3.2 och 3.3 där U är nätspänningen, S_k är kortslutningseffekten, Z_k kortslutningsimpedansen och ω är vinkelfrekvensen. Kortslutningsresistansen R_k antas vara 20 procent av kortslutningsimpedansen på grund av att luftledningarna antas vara inkommande ledningar till de småskaliga vattenkraftstationerna. Med kabel är kortslutningsresistansen ungefär lika stor som kortslutningsimpedansen. Större kortslutningsresistans i det inkommande nätet påverkar inte den transienta spänningen efter strömklippning nämnvärt efter strömklippning enligt simuleringarna.

$$Z_k = \frac{U^2}{S_k} \quad (3.2)$$

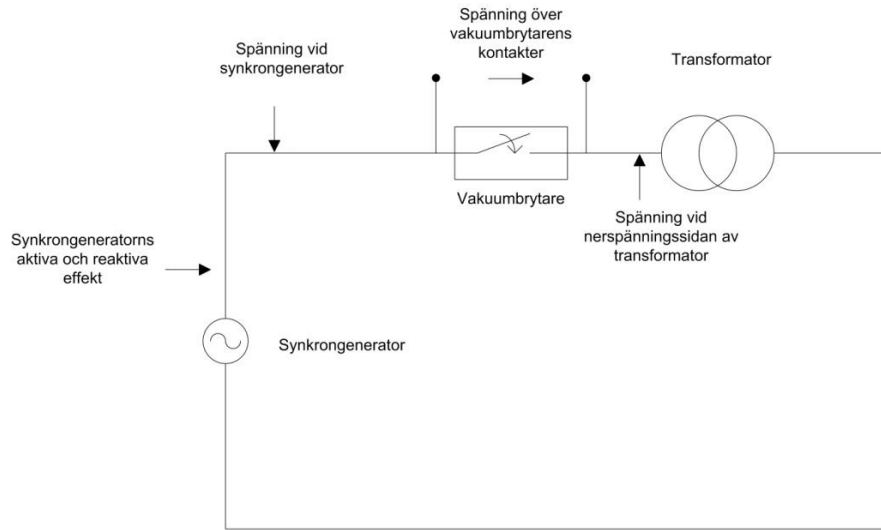
$$L \cong \frac{Z_k}{\omega} \quad (3.3)$$



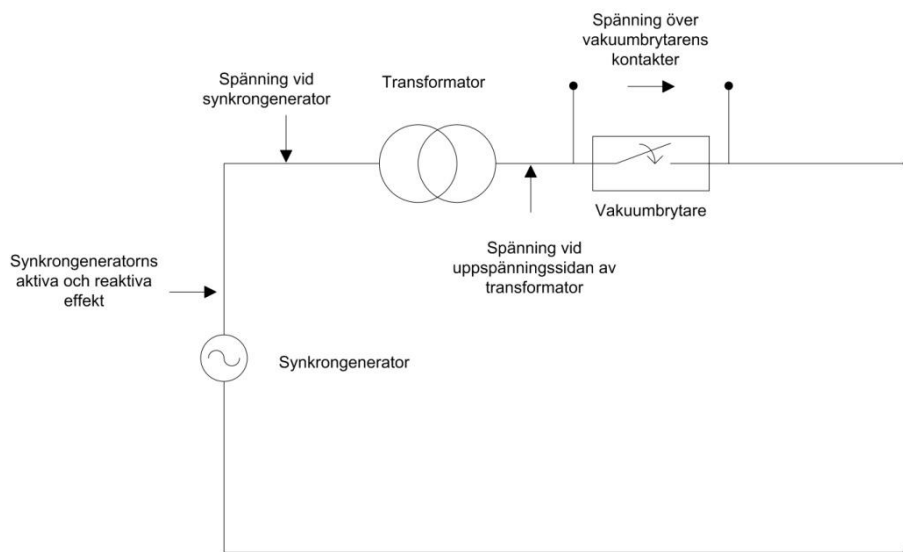
Figur 3.4 Modell av det inkommande nätet, en spänningskälla U , en kortslutningsresistans R_k och en induktans L .

3.4 Beräkningar i PSCAD-modellerna

I Figur 3.5 och Figur 3.6 nedan visas vart spännings- och effektberäkningarna har utförts i modellerna i PSCAD/EMTDC när vakuumbrytaren är placerad vid ner- respektive uppspänningssidan av transformatorn.



Figur 3.5 Spännings- och effektberäkningar i simuleringarna när vakuumbrytaren är placerad vid nerspänningssidan av transformatorn.



Figur 3.6 Spännings- och effektberäkningar i simuleringarna när vakuumbrytaren är placerad vid uppspänningssidan av transformatorn.

4 Simulering

Olika stationsutformningar studeras för att undersöka för vilka småskaliga vattenkraftstationer det kan uppstå risker med höga överspänningar och återtändningar. Alla resultat från simuleringarna presenteras i Appendix E och Appendix F, i detta kapitel redovisas de viktigaste resultaten mer i detalj. Riskerna indelas i tre olika nivåer, en första nivå där det inte finns risk, en andra nivå där risk finns att spänningen överstiger spänningshållfastheten och en tredje nivå där det finns risk för återtändningar som orsakar högfrekventa spänningstransienter som överstiger spänningshållfastheten. För tredje nivån är det stor risk för höga överspänningar vilket kräver åtgärder för att förhindra risker och skador av material, även för den andra nivån krävs åtgärder. De småskaliga vattenkraftstationerna delas in i lågspänningsstationer med driftspänningarna 0,4 kV till 0,66 kV, stationer med driftspänningarna 3,6 kV till 5 kV och stationer där vakuumbrytaren placeras vid uppspänningssidan av transformatorn. Brytning av strömmen sker normalt vid planerad brytning i verkligheten, vilket innebär att de småskaliga vattenkraftstationerna först reducerar aktiv och reaktiv effekt och sedan kopplas stationen ifrån nätet. Strömbrytning sker alltså vid tomgång, detta betyder att strömbrytning sker i de flesta fall med enbart reaktiv effekt. I simuleringarna sker brytning vid enbart reaktiv effekt för att få de värsta fallen. Spänningen efter strömklippning för de olika stationsutformningarna jämförs med toppvärdet av spänningarna.

4.1 Simulering av lågspänningsstationer

För lågspänning studeras lågspänningsstationer med driftspänningarna 0,4 kV och 0,66 kV med två stycken olika klippströmmar, 3 A och 5 A, för vakuumbrytaren.

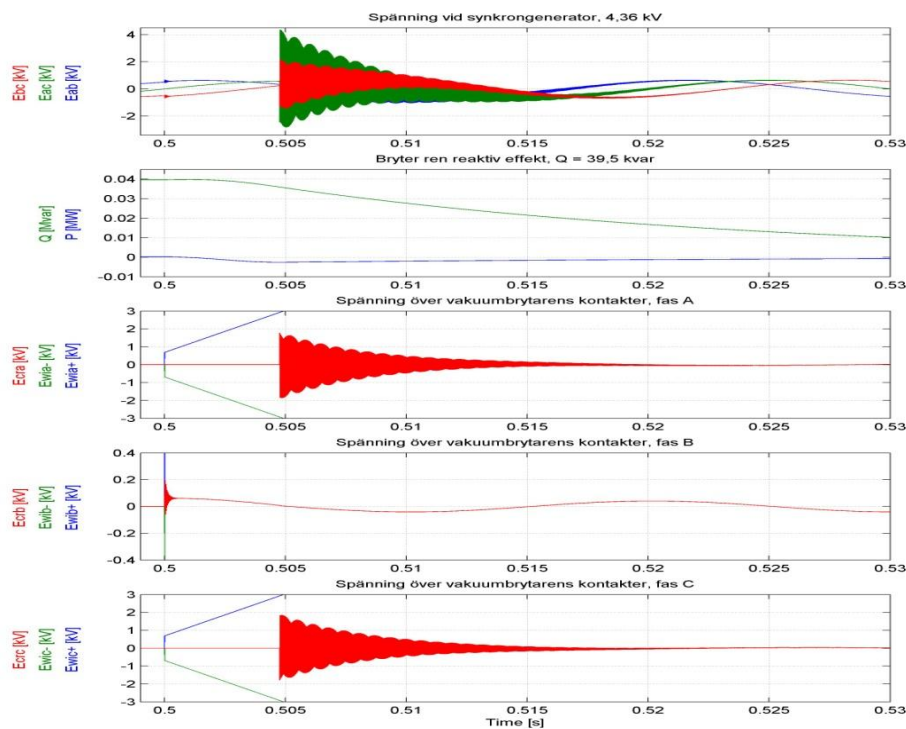
4.1.1 Driftspänning 0,4 kV

I Figur 4.1 studeras en vattenkraftstation med synkrogeneratoreffekten 100 kVA vilket är den minsta effekten som simulerats för driftspänning 0,4 kV. Spänningen vid synkrogeneratoren överstiger märkhållspänningen enligt Figur 4.1, den höga spänningen vid synkrogeneratoren beror bland annat på den höga klippströmmen i vakuumbrytaren, 5 A. En hög klippström ger en hög överspänning enligt ekvation 2.5. Spänningen vid nerspänningssidan av transformatorn är låg och påverkas inte nämnvärt av större värden på strökapacitanserna och mindre klippström i vakuumbrytaren enligt Tabell 4.1. Spänningen vid synkrogeneratoren minskar dock för större värden på strökapacitanserna och för mindre klippström enligt Tabell 4.1. Spänningen över vakuumbrytarens kontakter och spänningen vid synkrogeneratoren oscillerar med en ganska hög frekvens enligt Figur 4.1, 20 kHz, och dämpas relativt långsamt på grund av synkrogenerators och ledningarnas låga resistans. Ingen återtändning inträffar i vakuumbrytaren för att spänningshållfastheten i vakuumbrytaren (se Ewib+ och Ewib-)

ökar snabbare än överspänningen som bildas vid strömbrytning. Strömbrytningen i Figur 4.1 sker vid enbart reaktiv effekt, alltså är den aktiva effekten noll vilket ger vinkeln 90 grader mellan ström och spänning. Detta ger att strömklippning sker när spänningen vid synkrogeneratorn är maximal, alltså adderas överspänningen som bildas efter strömklippning på spänningens toppvärde vilket ger den högsta totala spänningen. Överspänningarna är som störst på faserna A och C över vakuumbrytarens kontakter efter strömklippning, vilket ger högst spänning mellan fas A och C enligt Figur 4.1. För att spänningen vid synkrogeneratorn inte skall överstiga spänningshållfastheten efter strömbrytning ökas synkrogenerators märkeffekt till 125 kVA enligt Tabell 4.1.

Tabell 4.1 Resulterande spänningar efter strömklippning med driftspänning 0,4 kV.

Driftspänning, effektivvärde [kV]	Märkhållspänning vid 50 Hz, toppvärde [kV]	Strömkapacitans synkrogenerator [nF]	Märkeffekt synkrogenerator [kVA]	Klippström [A]	Spänningen vid synkrogeneratorn, toppvärde [kV]	Spänningen vid nerspanningssidan av transformatorn, toppvärde [kV]
0,4	4,24	10	100	5	4,36	0,66
0,4	4,24	20	100	5	3,21	0,66
0,4	4,24	10	125	5	3,85	0,89
0,4	4,24	10	100	3	2,75	0,89

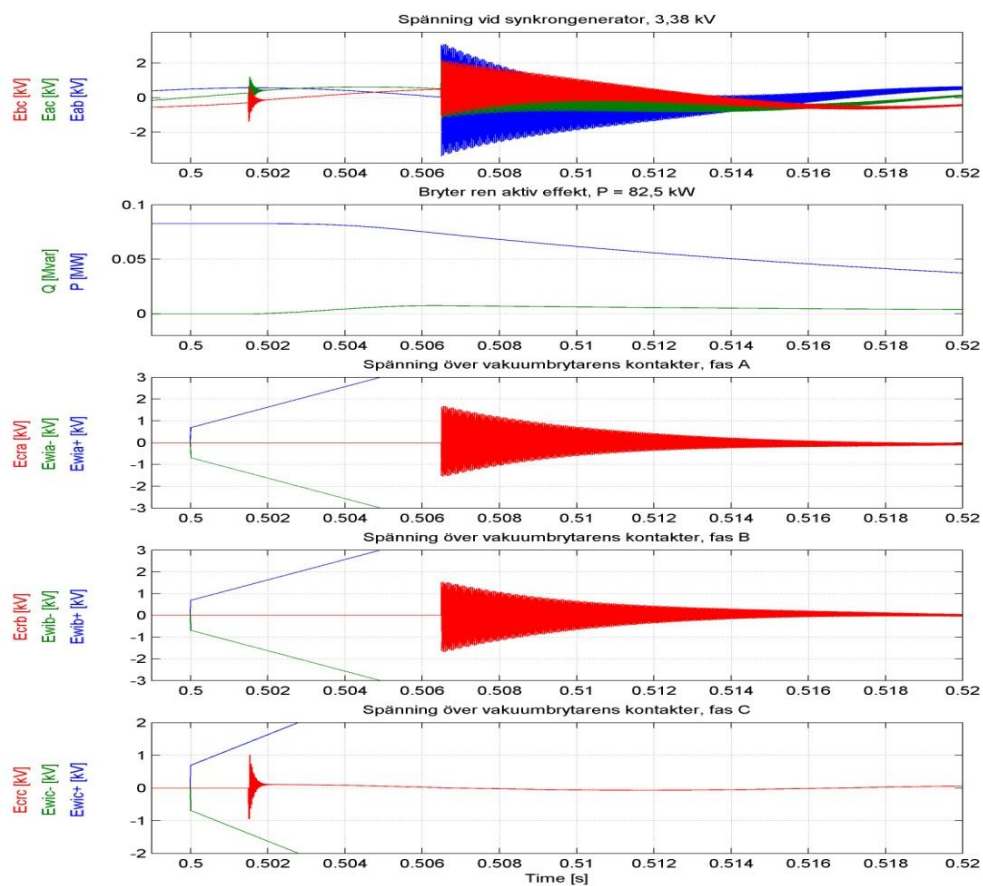


Figur 4.1 Ingen återtändning i vakuumbrytaren, överspänningen oscillerar med frekvensen 20 kHz. Figurens värden enligt första raden i Tabell 4.1.

I Figur 4.2 studeras strömbrytning vid enbart aktiv effekt, den reaktiva effekten är noll, det ger vinkeln noll grader mellan ström och spänning. Vilket betyder att överspänningen adderas med spänningen vid synkrogeneratoren då spänningen vid synkrogeneratoren är noll. Detta ger att den resulterande spänningen vid synkrogeneratoren blir lägre efter strömklippning, enligt Tabell 4.2, i jämförelse med strömklippning vid enbart reaktiv effekt enligt Figur 4.1. Fortsättningsvis studeras simuleringar då enbart reaktiv effekt bryts för att få fram de värsta fallen. Den oscillerande spänningen oscillerar även i det här fallet med en ganska hög frekvens och dämpas relativt långsamt vilket visas i Figur 4.2.

Tabell 4.2 Resultande spänningar när vakuumbrytaren bryter enbart aktiv effekt med driftspänning 0,4 kV.

Driftspänning, effektivvärde	Märkhållspänning vid 50 Hz, toppvärde	Strömkapacitans synkrogenerator	Märkeffekt synkrogenerator	f	Klippström	Spänningen vid synkrogeneratoren, toppvärde	Spänningen vid nerspänningssidan av transformatorn, toppvärde
[kV]	[kV]	[nF]	[kVA]	[kHz]	[A]	[kV]	[kV]
0,4	4,24	10	100	38	5	3,38	0,74



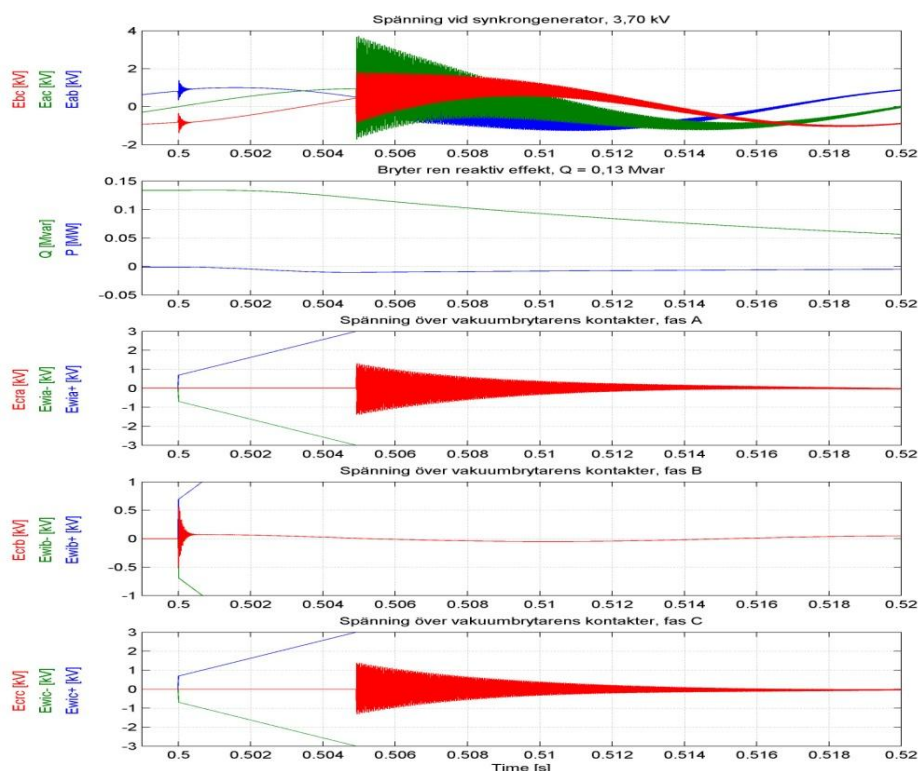
Figur 4.2 Bryter ren aktiv effekt för driftspänning 0,4 kV.

4.1.2 Driftspänning 0,66 kV

För 0,66 kV finns det inte synkrongeneratorer med lika låga märkeffekter som för 0,4 kV enligt Appendix D. Synkrongeneratorstorleken som undersöks i det här fallet är 500 kVA alltså fem gånger större än synkrongeneratorn för 0,4 kV. Den större synkrongeneratorstorleken ger att induktansen minskar och en ökad spänning ger att induktansen ökar för synkrongeneratorn enligt ekvation 2.4, synkrongeneratorstorleken påverkar dock mest för det här fallet. Induktansen i synkrongeneratorn minskar alltså vilket ger en lägre överspänning enligt ekvation 2.5 vilket stämmer överens med Figur 4.3 i jämförelse med strömbrytning vid lägre märkeffekt för synkrongeneratorn i Figur 4.1. Minskar transformatorns märkeffekt till lika stor märkeffekt som synkrongeneratorn, 500 kVA, ökar spänningen endast marginellt i jämförelse med 1,0 MVA transformator i Figur 4.3.

Tabell 4.3 Resultande spänningar efter strömklippning med driftspänning 0,66 kV.

Driftspänning, effektivvärde	Märkhållspänning vid 50 Hz, toppvärde	Strömkapacitans synkron-generator	Märkeffekt synkron-generator	f	Klippström	Spänningen vid synkron-generatorn, toppvärde	Spänningen vid nerspanningssidan av transformatorn, toppvärde
[kV]	[kV]	[nF]	[kVA]	[kHz]	[A]	[kV]	[kV]
0,66	4,24	10	500	21	5	3,70	0,66



Figur 4.3 Inga återtändningar i vakuumbrytaren för driftspänning 0,66 kV.

4.2 Simulering med driftspänningarna 3,6 kV och 5 kV

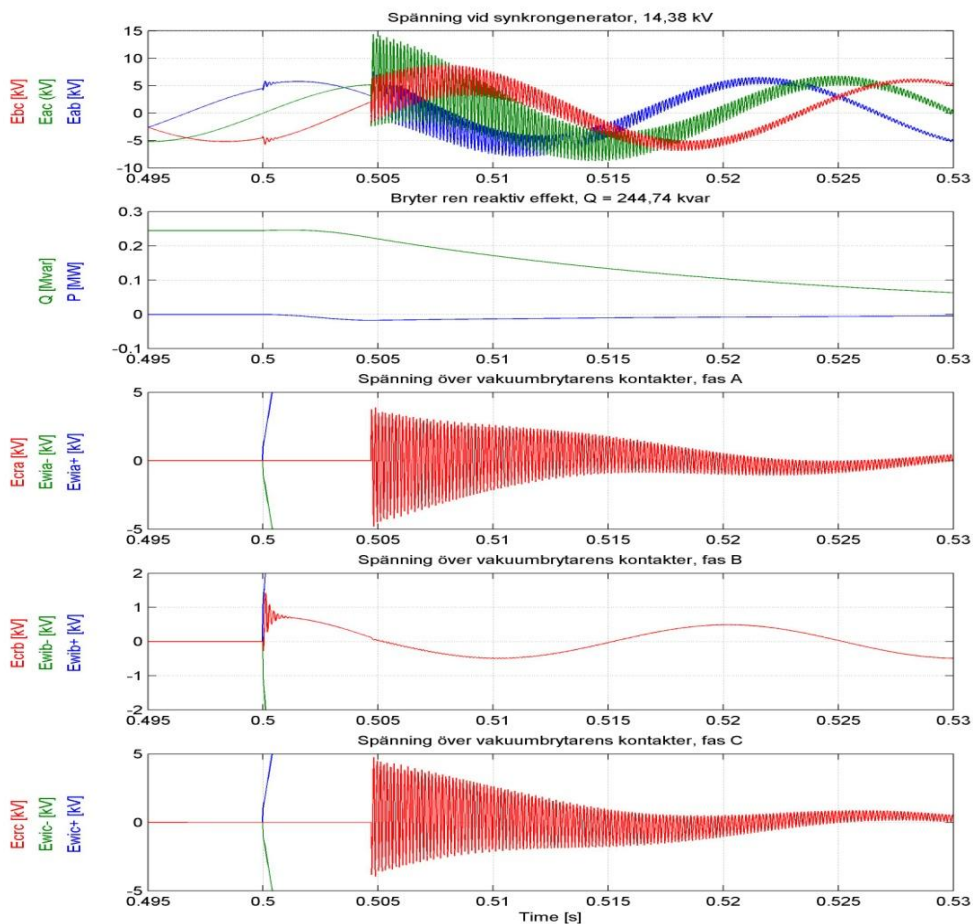
Driftspänningarna 3,6 kV och 5 kV studeras på grund av att dessa driftspänningar förekommer i de småskaliga vattenkraftstationerna när brytaren är placerad vid nerspänningssidan av transformatorn.

4.2.1 Driftspänning 3,6 kV

I Figur 4.4 studeras en synkrogenerator med märkeffekten 500 kVA vilket är den minsta synkrogeneratoren som simuleras för driftspänningen 3,6 kV. I det här fallet överstiger den transienta spänningen vid synkrogeneratoren märkhållspänningen för låga värden på strökapacitanserna samt för en hög klippström, dock sker ingen återtändning på någon fas i vakuumbrytaren. Ökar värdet på strökapacitanserna för synkrogeneratoren och synkrogenerators effekt, minskar spänningen vid synkrogeneratoren under märkhållspänning enligt Tabell 4.4. Tabell 4.4 visar också att spänningen vid nerspänningssidan av transformatorn är låg och påverkas knappt märkbart av olika stationsutformningar. För synkrogeneratorer vars märkeffekt är ungefär 600 kVA eller större är det ingen risk att spänningen vid synkrogeneratoren skall överstiga märkhållspänningen efter strömklippning enligt Tabell 4.4.

Tabell 4.4 Resultande spänningar efter strömklippning med driftspänning 3,6 kV.

Driftspänning, effektivvärde [kV]	Märkhållspänning vid 50 Hz, toppvärde [kV]	Strökapacitans synkrogenerator [nF]	Märkeffekt synkrogenerator [kVA]	Klippström [A]	Spänningen vid synkrogeneratoren, toppvärde [kV]	Spänningen vid nerspänningssidan av transformatorn, toppvärde [kV]
3,6	14,14	20	500	5	14,38	8,00
3,6	14,14	10	500	5	15,00	8,02
3,6	14,14	40	500	5	12,78	8,19
3,6	14,14	20	500	3	10,97	7,40
3,6	14,14	10	550	5	14,41	8,06
3,6	14,14	20	550	5	13,69	8,07
3,6	14,14	10	600	5	13,56	8,15
3,6	14,14	20	600	5	12,87	8,81



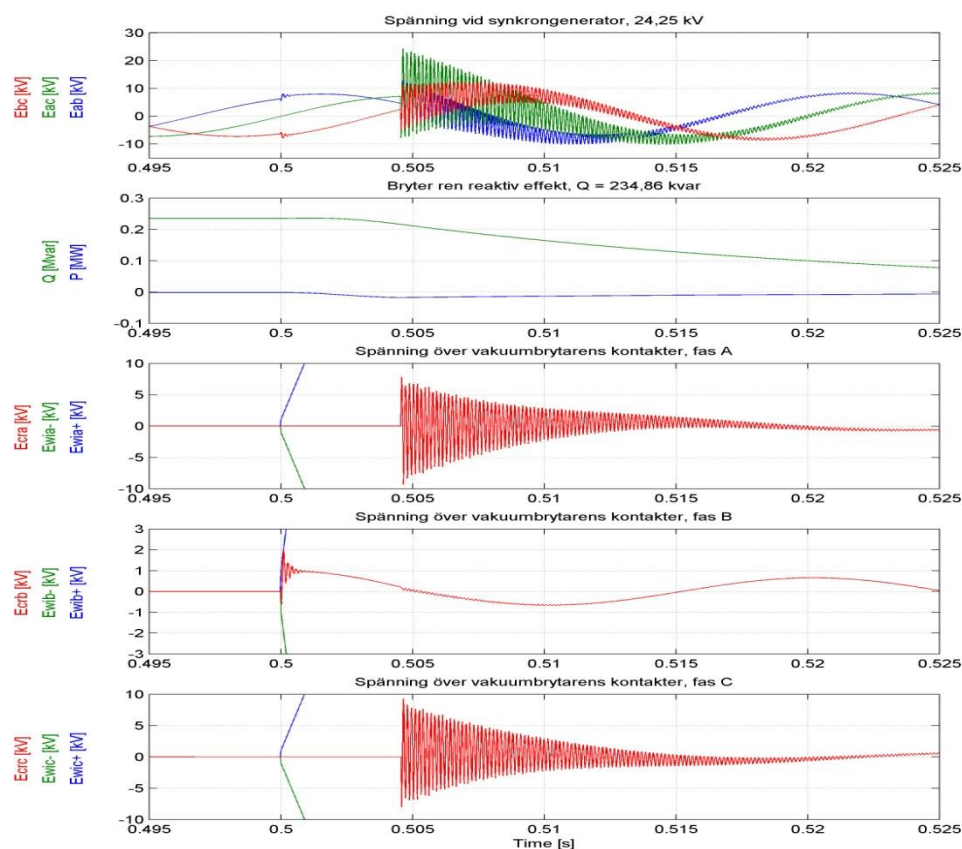
Figur 4.4 Inga återtändningar i vakuumbrytaren för driftspänning 3,6 kV, spänningen överstiger dock systemets märkhållspänning med frekvensen 7,1 kHz. Figurens värden enligt första raden i Tabell 4.4.

4.2.2 Driftspänning 5 kV

Den minsta synkrongeneratorstorleken som simuleras för driftspänningen 5 kV är 500 kVA, alltså lika stor storlek på synkrongeneratoren som för 3,6 kV. Vid driftspänningen 5 kV klarar utrustningen av höga spänningar på grund av att spänningshållfastheten är dubbelt så hög i jämförelse med driftspänningen 3,6 kV enligt Tabell 3.1. Spänningens amplitud vid synkrongeneratoren efter strömklippning i Figur 4.5 är betydligt högre för driftspänningen 5 kV, med frekvensen 5 kHz, i jämförelse med driftspänningen 3,6 kV enligt Tabell 4.5. Spänningen vid synkrongeneratoren och spänningen vid nerspänningssidan av transformatorn överstiger dock inte spänningshållfastheten vilket betyder att det inte är risk för höga spänningar efter strömklippning för driftspänningen 5 kV. Fler värden på den resulterande spänningen vid synkrongeneratoren när strökapacitanserna varieras för detta fall finns i Tabell 10.9 i Appendix E, där visas det att spänningen vid synkrongeneratoren minskar för större strökapacitanser.

Tabell 4.5 Resultande spänningar efter strömklippning med driftspänning 5 kV.

Driftspänning, effektivvärde [kV]	Märkhållspänning vid 50 Hz, toppvärde [kV]	Strökapacitans synkron-generator [nF]	Märkeffekt synkron-generator [kVA]	Klippström [A]	Spänningen vid synkron-generatorn, toppvärde [kV]	Spänningen vid nerspänningssidan av transformatorn, toppvärde [kV]
5	28,28	10	500	5	24,25	14,30
5	28,28	5	500	5	24,99	12,48
5	28,28	10	500	3	17,92	10,70



Figur 4.5 Inga återtändningar i vakuumbrytaren för driftspänning 5 kV, spänningshållfastheten växer snabbare än den transienta spänningen efter strömklippning i vakuumbrytaren. Figurens värden enligt första raden i Tabell 4.5.

4.3 Simulering med vakuumbrytare vid uppspänningssidan av transformatorn

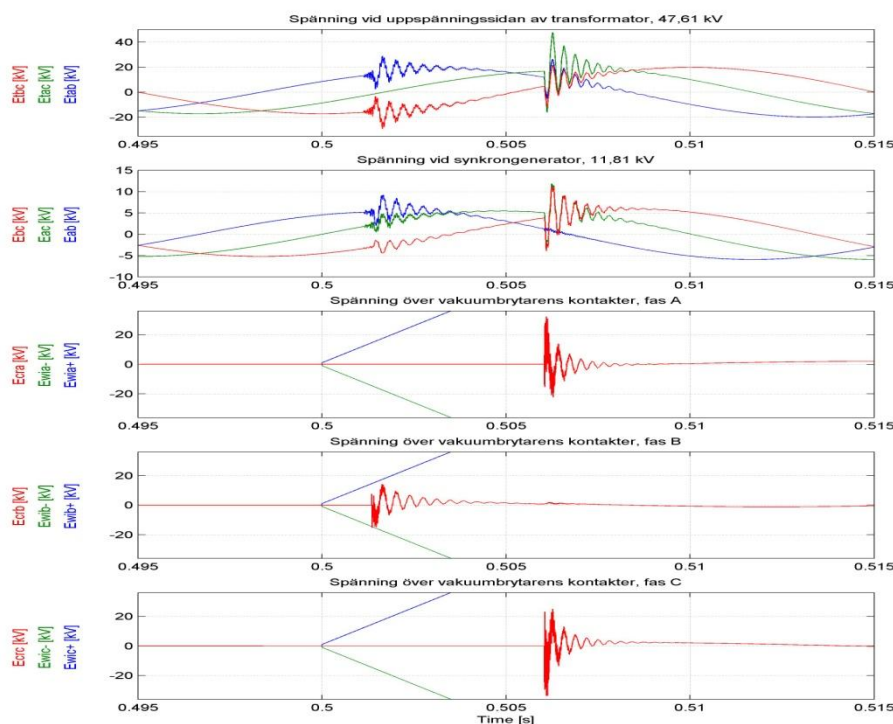
Hittills har simuleringarna utförts med vakuumbrytaren placerad mellan transformatorn och synkrongeneratorn, alltså vid nerspänningssidan av transformatorn. I det här kapitlet placeras vakuumbrytaren vid uppspänningssidan av transformatorn.

4.3.1 12/3,6 kV transformator

I Figur 4.6 är det risk att spänningen vid uppspänningssidan av transformatorn skall överstiga spänningshållfastheten med en återtändning på en fas. Även när vakuumbrytaren klipper strömmen vid en lägre klippström är det risk att spänningen vid uppspänningssidan av transformatorn blir hög efter strömklippning enligt Tabell 4.6. Spänningen vid synkrogeneratoren överstiger dock inte märkhållspänningen. För att spänningen vid uppspänningssidan av transformatorn inte skall överstiga den godkända spänningshållfastheten måste synkrogenerators märkeffekt öka ganska mycket för en hög klippström enligt Tabell 4.6.

Tabell 4.6 Resultierande spänningar efter strömklippning med vakuumbrytare vid uppspänningssidan av transformatorn 12/3,6 kV.

Driftspänning, effektivvärde [kV]	Märkhållspänning vid 50 Hz, toppvärde [kV]	Strökapacitans synkrogenerator [nF]	Märkeffekt synkrogenerator [kVA]	Klippström [A]	Spänningen vid uppspänningssidan av transformatorn, toppvärde [kV]	Spänningen vid synkrogeneratoren, toppvärde [kV]
12/3,6	39,60/14,14	10	850	5	47,61	11,81
12/3,6	39,60/14,14	10	850	3	40,92	9,87
12/3,6	39,60/14,14	10	1000	3	38,90	9,53
12/3,6	39,60/14,14	20	2000	5	43,50	10,42
12/3,6	39,60/14,14	10	2400	5	37,55	9,23



Figur 4.6 En återtändning på fas B i vakuumbrytaren. De höga överspänningarna på fas A och C bidrar till att spänningen vid uppspänningssidan av transformatorn överstiger märkhållspänningen. Figurens värden enligt första raden i Tabell 4.6.

För högre märkeffekt för transformatorn minskar spänningen vid uppspänningssidan av transformatorn när enligt Tabell 4.7.

Tabell 4.7 Hur transformatorns storlek påverkar spänningen vid uppspänningssidan av transformatorn 12/3,6 kV för en synkrogenerator med effekten 2,2 MVA då vakuumbrytaren klipper strömmen vid 5 A.

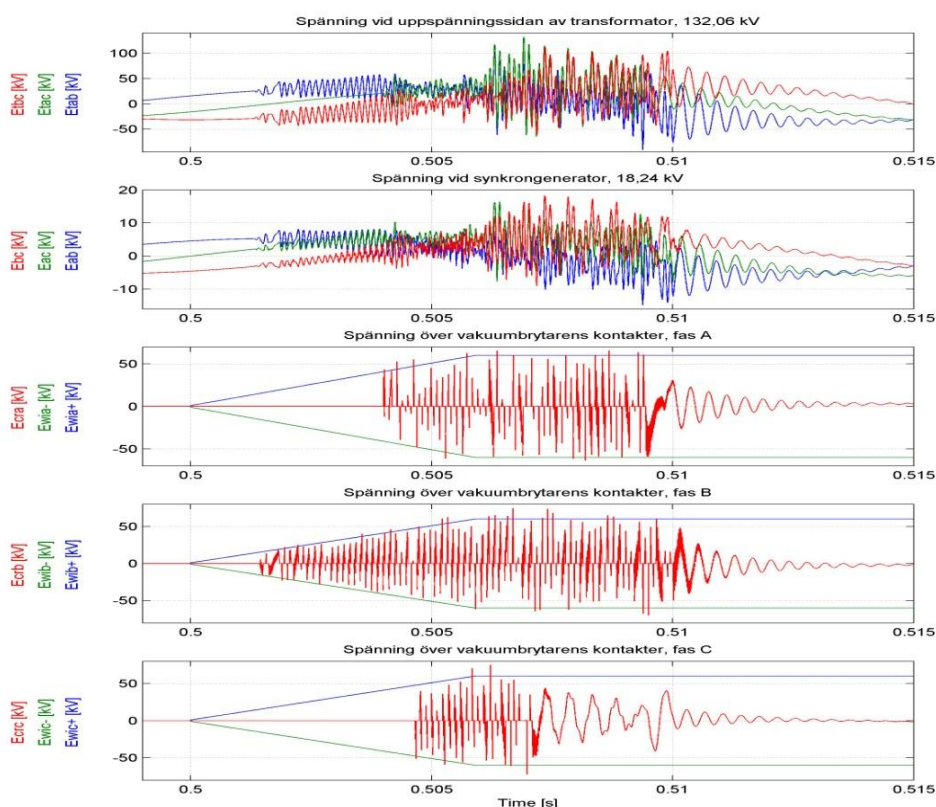
Transformatorns märkeffekt [MVA]	Spänningen vid uppspänningssidan av transformatorn [kV]
2,2	38,94
2,3	38,36
2,4	37,86
2,5	37,94
2,6	36,98
2,8	36,61
3,0	36,08

4.3.2 22/3,6 kV transformator

När transformatorspänningen ökar till 22/3,6 kV inträffar fler återtändningar i vakuumbrytaren i jämförelse med 12/3,6 kV transformator. Antalet återtändningar varierar för storleken på synkrogeneratorns strökapacitanser. Transformatorns kapacitanser påverkar också spänningen, transformatorns kapacitanser är endast 5 nF vilket medför att överspänningens amplitud och frekvens blir hög på grund av flera återtändningar. I Figur 4.7 visas det att spänningen både vid uppspänningssidan av transformatorn och vid synkrogeneratorn blir hög och överstiger märkhållspänningen på grund av flertalet återtändningar i vakuumbrytaren. Vakuumbrytaren lyckas till slut bryta strömmen vid tiden 0,51 sekunder, alltså efter en halv period. Det finns alltså risk för det här fallet som kräver åtgärder mot de höga spänningarna och återtändningarna. För att spänningen inte skall överstiga märkhållspänningen för en hög klippström i vakuumbrytaren behöver synkrogeneratorns märkeffekt ökas till ungefär 2,5 MVA enligt Tabell 4.8, dock inträffar det fortfarande återtändningar i vakuumbrytaren men endast ett fåtal. Transformatorns låga kapacitans spelar en stor roll för återtändningarna och de resulterande höga eskalerande spänningarna vid uppspänningssidan av transformatorn och vid synkrogeneratorn. Ökar värdet på transformatorns kapacitanser, minskar antalet återtändningar i vakuumbrytaren vilket ger lägre spänning vid uppspänningssidan av transformatorn och vid synkrogeneratorn enligt Tabell 4.8 och den transienta spänningens frekvens efter strömbrytning minskar.

Tabell 4.8 Resultande spänningar efter strömklippning med vakuumbrytare vid uppspänningssidan av transformatorn 22/3,6 kV.

Driftspänning, effektivvärde [kV]	Märkhållspänning vid 50 Hz, toppvärde [kV]	Kapacitans transformator [nF]	Märkeffekt synkron-generator [kVA]	Klippström [A]	Spänningen vid uppspänningssidan av transformatorn, toppvärde [kV]	Spänningen vid synkrongeneratorn, toppvärde [kV]
22/3,6	70,71/14,14	5	1500	3	132,61	18,24
22/3,6	70,71/14,14	5	2000	3	62,80	8,36
22/3,6	70,71/14,14	5	1000	5	115,54	13,62
22/3,6	70,71/14,14	50	1000	5	51,50	8,00
22/3,6	70,71/14,14	5	2000	5	122,32	19,94
22/3,6	70,71/14,14	5	2500	5	64,97	8,55

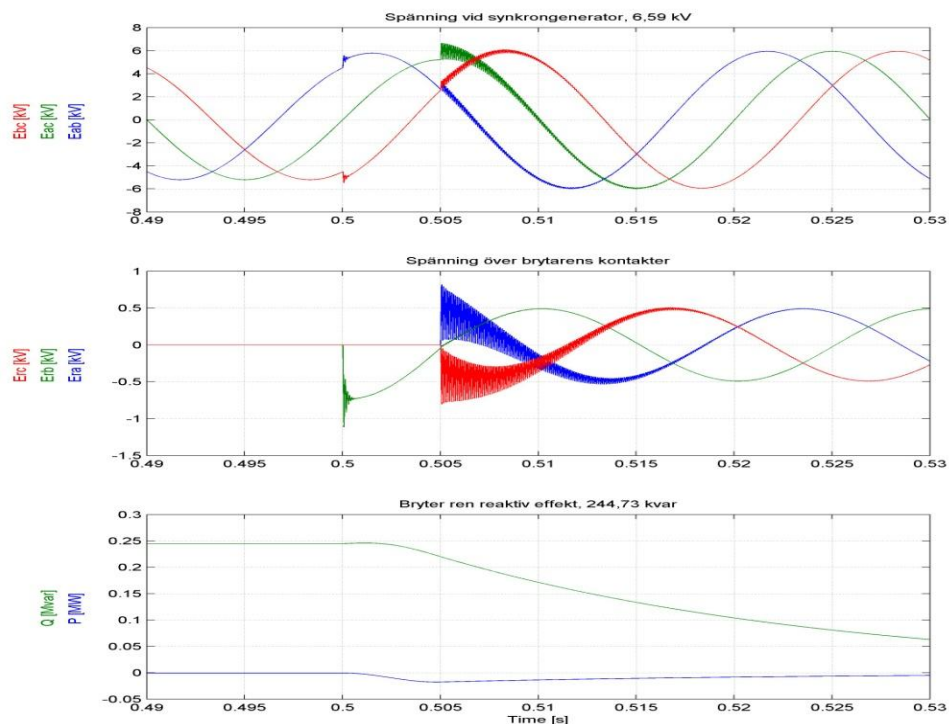


Figur 4.7 Återtändningarna i vakuumbrytaren genererar de höga eskalerande spänningarna med maxvärdet 132,06 kV vid uppspänningssidan av transformatorn, även vid synkrongeneratorn blir spänningen hög. Figurens värden enligt första raden i Tabell 4.8.

Med transformatorspänningen 22/0,4 kV blir det också risk för höga spänningar och återtändningar vid uppspänningssidan av transformatorn för synkrongeneratorer med liten märkeffekt. För synkrongeneratorer och transformatorer med märkeffekter mindre än ungefär 2,0 MVA med en hög klippström för vakuumbrytaren finns det risk för höga spänningar vid uppspänningssidan av transformatorn enligt Tabell 10.25 i Appendix F. När synkrongeneratorernas märkeffekter är större eller lika med cirka 2,0 MVA är det alltså ingen risk för höga spänningar efter strömklippning enligt Tabell 10.27.

4.4 Simulering med standardbrytare

Standardbrytaren i PSCAD bryter strömmen vid strömnoll, alltså sker ingen strömklippning som med vakuumbrytare, detta ger ingen eller en liten överspänning. I det här fallet föreligger det alltså ingen risk att spänningen vid synkrogeneratorn skall överstiga spänningshållfastheten utan återtändning. Spänningen kan maximalt bli 2 p.u. av driftspänningens toppvärde utan någon dämpning vid brytningen av strömmen vid strömnoll (Alexander & Dufournet 2008, s. 1). Spänningen över brytarens kontakter kan dock överstiga brytarens spänningshållfasthet på grund av att spänningen bildas direkt vid strömnoll enligt Figur 4.8.



Figur 4.8 Standardbrytare bryter strömmen vid strömnoll.

Den här simuleringen är till för att visa hur spänningen blir efter strömbrytning med standardbrytare. Den resulterande spänningen vid synkrogeneratorn är låg vilket visas i Figur 4.8, överspänningen är knappt märkbar vilket kan jämföras med Figur 4.4 där ett likadant fall simuleras med vakuumbrytare där vakuumbrytaren klipper strömmen vid en hög klippström. Överspänningen som bildas i Figur 4.8 beror på att enbart reaktiv effekt bryts, vilket ger en låg transientspänning. Spänningen som lagras i kapacitanserna visar sig som överspänningen efter att strömmen bryts vid strömnoll. Vid brytning av enbart aktiv effekt vid strömnoll blir överspänningen lägre i jämförelse med brytning av enbart reaktiv effekt. Detta beror på att vid aktiv effekt är ström och spänning i fas, kretsen som bryts vid aktiv effekt är nästan enbart resistiv vilket ger ingen eller en liten

överspänning. Att strömmen bryts vid strömnoll visas i andra bilden i Figur 4.8, den resulterande spänningen över brytaren på fas B visar sig direkt efter strömbrytning vid strömnoll vid tiden 0,5 sekunder. Den transienta överspänningen på förstbrytandefas har störst amplitud på fas B i brytaren enligt Figur 4.8. På de andra två faserna bryts strömmen vid tiden 0,505 sekunder, alltså 90 grader senare mot fas B.

4.5 Simulering med åtgärder mot höga spänningar

Det finns flera olika sätt att förhindra att höga transienta spänningar ska skada utrustningen i stationerna. Två exempel på hur höga spänningar kan förhindras visas och beskrivs i det här avsnittet för det värsta fallet med driftspänningen 3,6 kV när spänningen överstiger spänningshållfastheten.

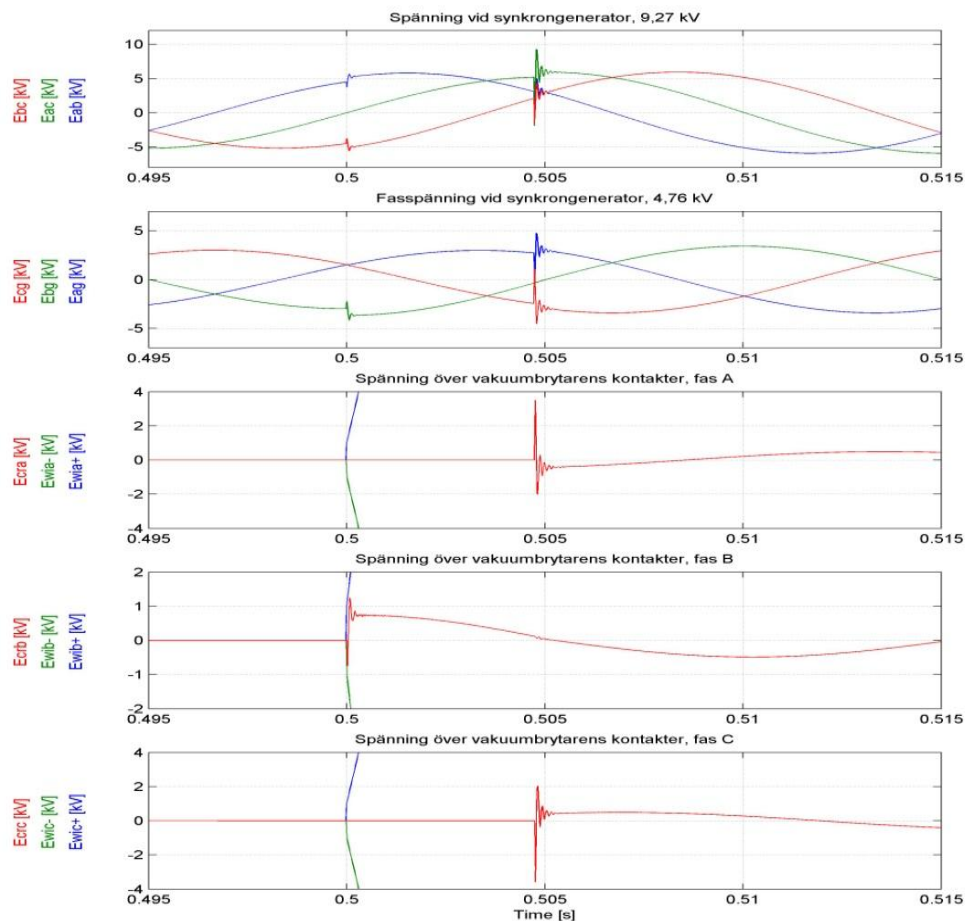
4.5.1 Skydd med ventilavledare

Ett effektivt sätt att skydda mot höga och eskalerande transienta spänningar är att installera ventilavledare. Ventilavledarna börjar leda vid en viss förutbestämd spänning och dämpar spänningen successivt. Placeringen för ventilavledarna beror på var vakuumbrytaren är placerad. Ifall vakuumbrytaren är placerad vid uppspänningssidan av transformatorn skall även ventilavledarna placeras på denna sida och så nära transformatorn som möjligt. I det andra fallet när vakuumbrytaren är placerad vid nerspänningssidan av transformatorn placeras ventilavledarna nära synkrongeneratorn. Ventilavledarna placeras nära synkrongeneratorn eller transformatorn för att skydda mot reflektioner av spänningen och höga spänningstransienter som kan bildas efter strömklippning i vakuumbrytaren.

Simuleringen som gav den högsta spänningen för driftspänningen 3,6 kV simuleras med en ventilavledare placerad på varje fas nära synkrongeneratorn. Överspänningens amplitud och frekvens minskar när ventilavledare installeras, vilket visas i Figur 4.9 och Tabell 4.9, i jämförelse med utan ventilavledare i Figur 4.4.

Tabell 4.9 Resultande spänningar efter strömklippning med en ventilavledare placerad på varje fas.

Driftspänning, effektivvärde [kV]	Märkhållspänning vid 50 Hz, toppvärde [kV]	Strökapacitans synkron-generator [nF]	Märkeffekt synkron-generator [kVA]	Klippström [A]	Spänningen vid synkron-generator, toppvärde [kV]	Spänningen vid nerspänningssidan av transformatorn, toppvärde [kV]
3,6	14,14	10	500	5	9,27	4,76



Figur 4.9 Simulering med ventilavledare placerad nära synkrongeneratorn, ingen återtändning på fas B. Spänningstransienten i vakuumbrytaren minskar i jämförelse med fallet utan ventilavledare i Figur 4.4.

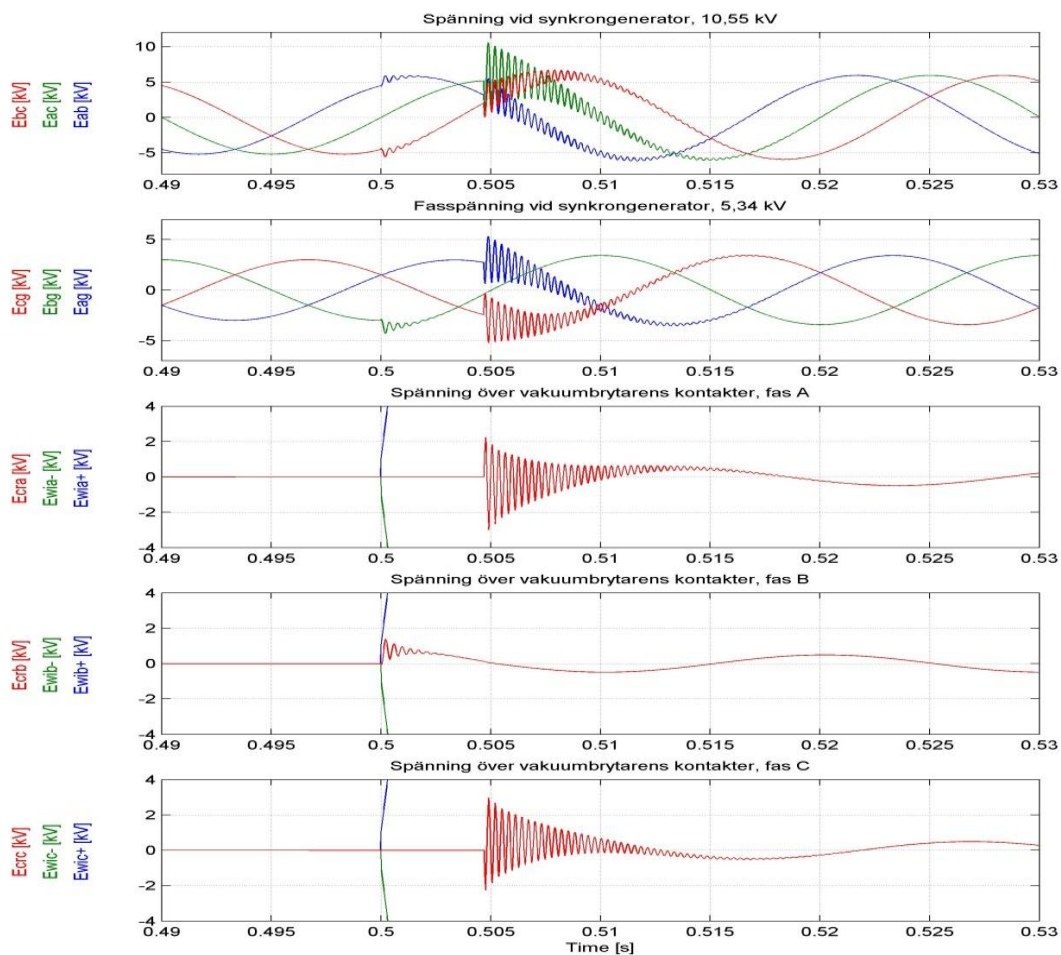
4.5.2 Skydd med RC-krets

Höga överspänningar kan även förhindras med en RC-krets som parallellkopplas till jord på varje fas vid synkrongeneratorn, ett exempel för det visas i Figur 4.10 nedan. Varje RC-krets består av en resistans (20 Ω) och en kapacitans (80 nF). RC-kretsen ger en god dämpning av överspänningarna, de resulterande spänningar vid synkron-generatorn översteg inte märkhållspänning enligt Figur 4.10 vilket kan jämföras med likadant fall i Figur 4.4 utan skydd. Det här exemplet är bara en vägledning hur en RC-krets kan tillämpas för att dämpa överspänningen. Resistansen dämpar överspänningen

och kapacitansen dämpar frekvensen. Resistansen skall väljas så att den stämmer överens med vågimpedansen i kabeln för att dämpa på bästa sätt, uppfylls detta blir reflektionen av spänningen noll. En ventilavledare och en RC-krets kan även kombineras som ett effektivt skydd mot transienta spänningar. Skyddskondensatorer kan även användas som skydd mot höga transienta spänningar (Abdulahovic 2009, s. 85f).

Tabell 4.10 Resultande spänningar efter strömklippning med en RC-krets placerad på varje fas.

Drift-spänning, effektivvärde [kV]	Märkhåll-spänning vid 50 Hz, toppvärde [kV]	Strö-kapacitans synkron-generator [nF]	Märkeffekt synkron-generator [kVA]	Klipp-ström [A]	Spänningen vid synkron-generatorn, toppvärde [kV]	Spänningen vid nerspänningssidan av transformatorn, toppvärde, [kV]
3,6	14,14	10	500	5	10,55	5,34



Figur 4.10 Simulering med en RC-krets placerad på varje fas till jord, inga återtändningar.

5 Teoretiska beräkningar vid strömklippning

I det här kapitlet behandlas teoretiska beräkningar för spänningen som bildas efter strömklippning med eller utan återtändning.

Spänningen som bildas efter en återtändning, med försumbar klippström, kan maximalt bli 3 p.u. av driftspänningens toppvärde utan någon dämpning enligt Roininen et al. (2009, s. 59). Detta ger spänningarna 1,70 kV för 0,4 kV och 2,80 kV för 0,66 kV. Vid en återtändning med låg klippström blir alltså spänningarna mindre än den tillåtna spänningshållfastheten 4,24 kV. För en hög klippström kan överspänningen som bildas efter en återtändning få ett högre värde enligt Tabell 5.1, den maximala spänningen vid en hög klippström kan beräknas med ekvation 2.12 och efter en återtändning med ekvation 2.14.

Tabell 5.1. Beräkning av överspänning och maxvärdet av spänningen efter strömklippning för driftspänningarna 0,4 kV och 0,66 kV med den transienta reaktansen 0,30 p.u.

I_{ch}	C	S	U	f	$V_{fasöverspänning}$	U_{max} utan återtändning	U_{max} hög klippström med en återtändning
[A]	[nF]	[kVA]	[kV]	[kHz]	[kV]	[kV]	[kV]
3	10	100	0,4	40,72	1,17	2,11	3,24
3	20	100	0,4	28,79	0,83	1,54	2,68
5	10	100	0,4	40,72	1,95	3,43	4,56
5	20	100	0,4	28,79	1,38	2,46	3,59
3	20	500	0,66	39,02	0,61	1,41	3,28
5	10	500	0,66	55,18	1,44	2,67	4,53
5	20	500	0,66	39,02	1,02	2,00	3,86
5	150	500	0,66	14,25	0,37	1,13	3,00

I Tabell 5.1 ovan visas teoretiska beräkningar av överspänningen och maxvärdet av den totala spänningen som bildas efter strömbrytning. Strömbrytning sker vid enbart reaktiv effekt utan och med en återtändning. De teoretiska värdena utan återtändning ligger under den godkända spänningshållfastheten 4,24 kV för lågspänning. När spänningen beräknas med en återtändning överstiger dock spänningen för de värsta fallen spänningshållfastheten enligt Tabell 5.1. Vid strömbrytning av enbart aktiv effekt adderas överspänningen med driftspänningen vid spänningsnoll. Detta ger en lägre total spänning än i fallet med brytning av enbart reaktiv effekt då överspänningen adderas med driftspänningens maxvärde vilket ger spänningen U_{max} i Tabell 5.1.

Tabell 5.2 Beräkning av överspänning och maxvärdet av spänningen efter strömklippning för driftspänningarna 3,6 kV och 5 kV med den transienta reaktansen 0,30 p.u.

I_{ch}	C	S	U	f	$V_{fasöverspänning}$	U_{max} utan återtändning	U_{max} hög klippström med en återtändning
[A]	[nF]	[kVA]	[kV]	[kHz]	[kV]	[kV]	[kV]
3	10	500	3,6	10,12	4,72	9,63	19,81
3	20	1000	3,6	10,12	2,36	6,53	16,71
3	100	4000	3,6	9,05	0,53	5,17	15,36
5	10	500	3,6	10,12	7,87	14,55	24,73
5	20	500	3,6	7,15	5,56	10,90	21,08
5	20	1000	3,6	10,12	3,93	8,50	18,69
3	20	500	5	5,15	4,64	10,70	24,84
5	10	500	5	7,28	10,93	20,20	34,34
5	20	500	5	5,15	7,73	15,13	29,28
5	20	1000	5	7,28	5,46	11,81	25,94
5	20	2000	5	10,30	3,86	9,73	23,88

I Tabell 5.2 ovan visas teoretiska beräkningar för driftspänningarna 3,6 kV och 5 kV för olika fall. Spänningarna som bildas efter strömklippning utan återtändning överstiger inte spänningshållfastheten, 14,14 kV för 3,6 kV och 28,28 kV för 5 kV, för de flesta fallen utom vid ett fall med driftspänningen 3,6 kV enligt Tabell 5.2. Det finns alltså risk för höga spänningar utan återtändning för det värsta fallet för driftspänningen 3,6 kV. När spänningen beräknades med en återtändning blev spänningen hög och översteg den godkända spänningshållfastheten för de flesta fallen enligt de teoretiska värdena i Tabell 5.2. När vakuumbrytaren klipper strömmen vid en låg klippström med en återtändning kan spänningen maximalt bli 3 p.u. av driftspänningens toppvärde enligt Roininen et al. (2009, s. 59). Detta ger spänningarna, 15,27 kV för 3,6 kV och 21,21 kV för 5 kV. Det finns alltså risk för höga spänningar för driftspänningen 3,6 kV både utan och med en återtändning enligt de teoretiska beräkningarna. För driftspänningen 5 kV är det dock endast risk för höga spänningar vid en återtändning med en hög klippström enligt Tabell 5.2.

6 Analys och diskussion

En förenklad teoretisk analys och en analys av simuleringarna utförs och jämförs för att se hur väl den förenklade teoretiska analysen stämmer överens med simuleringarna.

6.1 Analys av simuleringarna

I det här avsnittet analyseras simuleringarna från PSCAD/EMTDC. Analysen delas upp i lågspänningsstationer, stationer med driftspänningarna 3,6 kV till 5 kV samt stationer där vakuumbrytaren placeras vid uppspänningssidan av transformatorn.

6.1.1 Lågspänningsstationer

För driftspänningen 0,4 kV med en liten synkrongenerator 100 kVA och en hög klippström för vakuumbrytaren erhöles spänningen 4,36 kV efter strömbrytning. För det fallet är det alltså risk för höga spänningar. För synkrongeneratorer med högre märkeffekt och med högre driftspänning (0,66 kV) minskar den resulterande spänningen vid synkrongeneratorn enligt Figur 4.3 i jämförelse med en synkrongenerator med lägre märkeffekt för driftspänningen 0,4 kV. Högre märkeffekt för synkrongeneratorn ger således mindre överspänning. Även vid strömbrytning med enbart aktiv effekt blir den resulterande spänningen vid synkrongeneratorn i simuleringarna lägre än i fallet med enbart reaktiv effekt. Det sambandet stämmer överens med teorin att strömbrytning av enbart aktiv effekt ger en lägre total spänning på grund av att överspänningen adderas med driftspänningen vid spänningsnoll. Detta betyder enligt simuleringarna med lågspänning att vakuumbrytare kan installeras utan att det blir några problem eller risker med höga transienta spänningar för synkrongeneratorer vars märkeffekt är större eller lika med cirka 125 kVA. För lågspänningsstationer är det alltså ingen risk, det vill säga för de flesta småskaliga vattenkraftstationerna, att spänningen vid synkrongeneratorn efter strömklippning med vakuumbrytare skall bli större än den godkända spänningshållfastheten enligt simuleringarna. Det finns dock risk för höga spänningar vid synkrongeneratorn när synkrongeneratorns märkeffekt är liten, synkrongeneratorns strökapacitanser är små och när vakuumbrytaren klipper strömmen vid en hög klippström enligt simuleringarna.

Modellen för synkrongeneratorn visar antagligen högre värden på spänningen efter strömklippning än det hade blivit i verkligheten på grund av att synkrongeneratormodellen enbart tar hänsyn till den transienta reaktansen. Den transienta reaktansen bidrar till att induktansen får ett högre värde vilket ger en högre överspänning än när den subtransienta reaktansen används, på grund av att den subtransienta reaktansen har ett lägre värde. Synkrongeneratorn har även i verkligheten en mycket mer avancerade krets med fler induktanser, kapacitanser och resistanser vilket bidrar till mer förluster

och begränsningar av spänningen. De värden som erhållits med den här modellen är troligen det värsta scenariot av de olika fallen.

6.1.2 Stationer med driftspänningarna 3,6 kV och 5 kV

Vid driftspänningen 3,6 kV upptäcktes problem med små synkrogeneratorer när vakuumbrytaren klipper strömmen vid en hög klippström. De högsta värdena på spänningarna inträffade för små strökapacitanser i synkrogeneratorn, det gav spänningarna 15,00 kV och 14,38 kV för de värsta fallen för driftspänningen 3,6 kV. Dock inträffade inga återtändningar för de givna överspänningarna. För högre värden på strökapacitanserna minskade spänningen till värden under den godkända spänningshållfastheten. Även för högre märkeffekt i synkrogeneratorn, cirka 600 kVA eller högre, blir den resulterande spänningen efter strömklippning mindre än den godkända spänningshållfastheten. I och med detta finns det risk för höga spänningar vid synkrogeneratorn för synkrogeneratorer vars märkeffekt är mindre än cirka 600 kVA och strökapacitanserna för synkrogeneratorn skall även ha ett lågt värde. De höga spänningarna som bildas vid de värsta fallen för driftspänningen 3,6 kV kan dämpas effektivt vid installation av ventilavledare vilket visas i Figur 4.9. Ventilavledarna installeras så nära synkrogeneratorn som möjligt för att motverka reflektioner av spänningen.

För driftspänningen 5 kV simulerades samma storlek på synkrogeneratorn som för driftspänningen 3,6 kV, 500 kVA. Spänningen ökade betydligt från fallet med driftspänningen 3,6 kV. Spänningshållfastheten är samtidigt dubbelt så hög för 5 kV, för att driftspänningen 5 kV har konstruktionsspänning 7,2 kV, detta ger att höga överspänningar accepteras för driftspänningen 5 kV. Det är alltså inte så sannolikt att spänningen skall överstiga spänningshållfastheten utan återtändning vilket visas i simuleringarna. Den maximala spänningen vid synkrogeneratorn efter strömklippning för det värsta fallet för driftspänningen 5 kV översteg inte spänningshållfastheten. Detta betyder att det inte är någon risk att installera vakuumbrytare för stationer med driftspänningen 5 kV.

Summerat betyder det att en hög spänning som bildas efter strömklippning vid synkrogeneratorn beror till största del på synkrogenerators låga effekt, hög spänning, små strökapacitanser och när vakuumbrytaren klipper strömmen vid en hög klippström. Osäkerheten på värdet för strökapacitanserna i synkrogeneratorn är stor som tidigare nämnts vilket medför att det är svårt att säga ifall det finns risk för höga spänningar. För små värden på strökapacitanserna och en liten märkeffekt för synkrogeneratorn finns det risk för höga spänningar efter strömklippning med spänningsnivån 3,6 kV. Detta betyder att för de flesta småskaliga vattenkraftstationer

med brytaren placerad vid nerspänningssidan av transformatorn är det riskfritt att installera vakuumbrytare.

6.1.3 Stationer där vakuumbrytaren placeras vid uppspänningssidan av transformatorn

Problem med höga högfrekventa transienta spänningar inträffar när vakuumbrytaren placeras vid uppspänningssidan av transformatorn enligt simuleringarna. Problemen beror till viss del på transformatorns låga kapacitans. Kapacitanserna i transformatormodellen är endast 5 nF, vid större värden på kapacitanserna i transformatorn minskar spänningen vid uppspänningssidan av transformatorn. Transformatorer med hög kapacitans minskar alltså problemen med höga spänningar enligt simuleringarna. Transformatorns höga induktans påverkar sannolikt också överspänningen, en hög induktans ger en hög överspänning enligt ekvation 2.5. För transformatorer och synkrongeneratorer med liten märkeffekt bildas höga spänningstransienter på grund av flertalet återtändningar i vakuumbrytaren. Ett exempel på det är när transformatorns och synkrongeneratorns storlek är mindre än 2,5 MVA med en hög klippström, 5 A, för 22/3,6 kV transformator. Risker för höga spänningstransienter efter återtändningar finns alltså för synkrongeneratorer och transformatorer vars märkeffekt är mindre än cirka 2,5 MVA. För synkrongeneratorer vars märkeffekt är ungefär 2,5 MVA eller större blir därför spänningen vid uppspänningssidan av transformatorn mindre än den godkända spänningshållfastheten efter strömklippning. Dock sker återtändningar, men antalet återtändningar och överspänningens frekvens minskar i jämförelse med lägre märkeffekt. Spänningen efter strömklippning minskar även för större märkeffekt hos transformatorn när synkrongenerators märkeffekt är konstant enligt Tabell 4.7. Sammanfattningsvis finns det större risk, för höga spänningar och återtändningar, när vakuumbrytaren placeras vid uppspänningssidan av transformatorn i jämförelse med när vakuumbrytaren placeras vid nerspänningssidan av transformatorn. När vakuumbrytaren placeras vid nerspänningssidan av transformatorn blir det en annan krets med ett högre värde på kapacitansen som håller nere spänningen efter strömklippning och motverkar återtändningar.

6.2 Förenklad teoretisk analys vid strömklippning

Vid simuleringarna med lågspänning blev spänningen vid synkrongeneratorn efter strömklippning för det värsta fallet 4,36 kV utan någon återtändning i jämförelse mot 3,43 kV vid de teoretiska beräkningarna för samma fall. Detta betyder att det är endast risk att spänningen vid synkrongeneratorn skall överstiga spänningshållfastheten för väldigt små synkrongeneratorer, med låg kapacitans, för driftspänningen 0,4 kV och när vakuumbrytaren klipper strömmen vid en hög klippström. För de flesta lågspänningstationer är det alltså ingen risk att installera vakuumbrytare.

För driftspänningen 3,6 kV finns det risk för att spänningen skall överstiga spänningshållfastheten efter strömklippning både utan och med en återtändning enligt de teoretiska beräkningarna i Tabell 5.2. För driftspänningen 5 kV är det endast risk för höga spänningar efter en återtändning med en hög klippström enligt de teoretiska beräkningarna i Tabell 5.2. För driftspänningen 3,6 kV finns det således risk att spänningen skall överstiga spänningshållfastheten efter strömklippning enligt Tabell 5.2, detta stämmer överens med simuleringarna för driftspänningen 3,6 kV att det blir risk för höga spänningar efter strömklippning för de värsta fallen. I simuleringarna inträffade dock inte återtändningar för driftspänningarna 3,6 kV och 5 kV. Ifall återtändningar skulle inträffa kan det finnas risk för höga spänningar enligt de teoretiska beräkningarna.

Enligt de teoretiska beräkningarna i Tabell 5.1 och Tabell 5.2 ökar den totala spänningen efter strömklippning vid låg märkeffekt för synkrongeneratoren, hög märkspänning, låg kapacitans och hög klippström för vakuumbrytaren. Likadant samband framkom vid simuleringarna att spänningen ökar efter strömklippning med låg märkeffekt för synkrongeneratoren, hög märkspänning, låg kapacitans och hög klippström för vakuumbrytaren.

6.3 Stationsutformningar med risker för höga spänningar

Störst risk blir det för småskaliga vattenkraftstationer med låg märkeffekt för synkrongeneratoren, hög märkspänning, hög klippström för vakuumbrytaren och låg kapacitans för synkrongeneratoren när vakuumbrytaren placeras vid nerspänningssidan av transformatorn. En låg märkeffekt och en hög märkspänning bidrar till att induktansen blir stor enligt ekvation 2.4. En hög induktans, en liten kapacitans och en hög klippström bidrar till att överspänningen blir hög enligt ekvation 2.5.

För lågspänning finns det risk för vissa extremfall. Kriterierna för att vara inom riskzonen för att spänningen vid synkrongeneratoren skall överstiga den godkända spänningshållfastheten är enligt simuleringarna:

- Synkrongenerators märkeffekt skall vara mindre än cirka 125 kVA
- Synkrongenerators märkspänning skall vara 0,4 kV
- Synkrongenerators strökapacitanser skall ha värdet 10 nF
- Vakuumbrytaren skall klippa strömmen vid minst 5 A

För småskaliga vattenkraftstationer med driftspänningarna 3,6 kV och 5 kV skall de småskaliga vattenkraftstationerna ha vissa kriterier för att vara inom riskzonen för att spänningen skall överstiga den godkända spänningshållfastheten enligt simuleringarna. Kriterierna är:

- Synkrongeneratorns märkeffekt skall vara mindre än cirka 600 kVA
- Synkrongeneratorns märkspänning skall vara 3,6 kV
- Synkrongeneratorns strökapacitanser skall ha värdet 10 nF till 20 nF
- Vakuumbrytaren skall klippa strömmen vid minst 5 A

När vakuumbrytaren placeras vid uppspänningssidan av transformatorn finns det vissa kriterier för att risker skall finnas, såsom återtändningar och att spänningen skall överstiga spänningshållfastheten enligt simuleringarna. Kriterierna är:

- Transformatorns kapacitans skall vara liten
- Vakuumbrytaren skall klippa strömmen vid ett högt värde, ≥ 3 A
- Synkrongeneratorns och transformatorns märkeffekt skall vara mindre än cirka 2,5 MVA

6.4 Risktabeller

Risktabellerna Tabell 6.1, Tabell 6.2 och Tabell 6.3 nedan beskriver risker för höga spänningar och återtändningar med vakuumbrytare för olika stationsutformningar av de småskaliga vattenkraftstationerna. Den gröna färgen betyder att det är riskfritt för höga spänningar och återtändningar, gul färg betyder att det är risk för höga spänningar utan återtändningar och röd färg betyder att det är hög risk för höga spänningar med återtändningar.

Risktabellerna nedan behandlar alltså enbart riskerna för höga spänningar och återtändningar som uppkommer vid strömbrytning. Andra risker som bortfall av produktion, kostnader vid avbrott, kostnader för reparationer vid skadad utrustning, hur ett långvarigt avbrott påverkar nätet runt omkring och ifall det är lönsamt att ersätta eller laga viss utrustning efter fel tas inte upp i denna rapport. Studier av dessa risker tillsammans med riskerna för höga spänningar och återtändningar efter strömbrytning från denna rapport föreslås som framtida arbeten i kapitel 8.

Tabell 6.1 Risker för olika stationsutformningar för driftspänningen 0,4 kV när vakuumbrytaren klipper strömmen vid en hög klippström, 5 A.

		Märkeffekt synkrogenerator [kVA]		
		100	125	150
Strökapacitans synkrogenerator [nF]	10			
	20			

Tabell 6.2 Risker för olika stationsutformningar med en hög klippström 5 A och små strökapacitanser (10 nF) för synkrogeneratören.

		Märkeffekt synkrogenerator [kVA]		
		500	550	600
Driftspänning [kV]	0,66			
	3,6			
	5,0			

Tabell 6.3 Risker för höga spänningar och återtändningar för olika stationsutformningar när vakuumbrytaren placeras vid uppspänningssidan av transformatorn med en hög klippström 5 A och små strökapacitanser för synkrogeneratören och transformatorn.

		Märkeffekt synkrogenerator och transformator [kVA]					
		850	1000	1500	2000	2400	2500
Transformatorspänning [kV]	12/3,6						
	22/0,4						
	22/3,6						

7 Slutsatser och rekommendationer

Vakuumbrytare kan installeras för de flesta fall när brytaren är placerad vid nerspänningssidan av transformatorn utan att det blir risk för höga spänningar vid synkrongeneratorn. Det kan dock bli problem med höga spänningstransienter för vissa fall enligt simuleringarna när synkrongeneratorns märkeffekt är liten, cirka 550 kVA eller mindre, och när synkrongeneratorns strökapacitanser är små för driftspänningen 3,6 kV. Ifall återtändningar skulle inträffa för driftspänningarna 3,6 kV och 5 kV finns det risk för höga spänningar enligt de teoretiska beräkningarna, dock visar simuleringarna för dessa driftspänningar att återtändningar inte inträffar.

För driftspänningen 0,4 kV blir det endast risk för ett fall med höga spänningar vid synkrongeneratorn, enligt Tabell 6.1, när synkrongeneratorns märkeffekt är liten. Risk för att spänningen vid synkrongeneratorn efter strömklippning skall överstiga spänningshållfastheten kan därmed uteslutas för de flesta fallen när vakuumbrytaren är placerad vid nerspänningssidan av transformatorn för småskaliga vattenkraftstationer med lågspänning enligt simuleringarna.

Det finns alltså risk för höga spänningstransienter med vakuumbrytare i småskaliga vattenkraftstationer när synkrongeneratorn har liten märkeffekt, hög märkspänning, liten kapacitans och när vakuumbrytaren klipper strömmen vid en hög klippström. I de fall när vakuumbrytaren orsakar höga spänningstransienter kan riskerna elimineras vid installation av ventilavledare vid synkrongeneratorn enligt simuleringarna.

Större risker för återtändningar och resulterande högfrekventa höga spänningstransienter finns när vakuumbrytaren placeras vid uppspänningssidan av transformatorn jämfört med när vakuumbrytaren placeras vid nerspänningssidan av transformatorn. Återtändningar inträffar i alla de simulerade fallen, även när den resulterande spänningen efter strömklippning blev mindre än spänningshållfastheten. Detta kan betyda att höga spänningstransienter kan inträffa även för dessa fall, återtändningar minskade dock i antal. Risker för höga spänningstransienter minskar med större kapacitans för transformatorn, större effekt på synkrongeneratorn och transformatorn. Riskerna kan minimeras vid installation av ventilavledare vid uppspänningssidan av transformatorn enligt simuleringarna.

Rekommendationerna är att studera och utföra mätningar för småskaliga vattenkraftstationer som ligger inom riskområdet enligt angivna parametrar för riskerna, i stationer där det finns eller kommer att installeras vakuumbrytare. Ett exempel på en småskalig vattenkraftstation där det kan finnas risk för höga spänningar och återtändningar, vid strömbrytning med vakuumbrytare, är Kinnaström. Vattenkraftstationens parametrar stämmer överens med riskparametrarna på grund av att brytaren är placerad vid upp-

spänningssidan av transformatorn och synkrogeneratorns effekt är låg. Förslag till åtgärder i denna station är att utföra mätningar av spänningen, vid synkrogeneratorn och transformator, som bildas efter strömbrytning med vakuumbrytare och installera ventilavledare vid uppspanningssidan av transformatorn för att motverka risk för höga spänningar.

8 Framtida arbete

Under examensarbetets gång har vissa frågeställningar kommit upp. Detta är några förslag till framtida projekt inom området:

- Verifiering av modellen genom mätningar i en uppbyggd modell eller mätningar i en befintlig småskalig vattenkraftstation behöver utföras för att verifiera simuleringarna.
- Även mätning av synkrongeneratorernas kapacitans skulle behöva ställas som krav vid upphandling eftersom informationen om kapacitansernas värden inte har gått att finna.
- Mer studier när vakuumbrytaren placeras vid uppspänningssidan av transformatorn med åtgärder mot de höga transienta spänningarna som bildas efter strömbrytning.
- Fortsatta studier och simuleringar när ventilavledare, RC-kretsar och skyddskondensatorer används som skydd mot höga spänningar efter strömklippning med vakuumbrytare.
- Undersöka hur mycket energi som utvecklas i ventilavledaren när den transienta överspänningen begränsas. Detta för att studera hur ventilavledaren påverkas vid användning som skydd mot transienta överspänningar från vakuumbrytare. Ventilavledare är vanligtvis inte anpassade för dessa situationer och riktlinjer, vanligtvis används de som skydd mot höga spänningar från blixtnedslag.
- Studera samverkan mellan de tekniska riskerna, med höga spänningar och återtändningar som kan förstöra ansluten utrustning, och andra risker som kan inträffa vid avbrott och produktionsbortfall som berör de småskaliga vattenkraftstationerna. De andra riskerna kan vara bortfall av produktion, kostnader vid avbrott, kostnader för reparationer vid skadad utrustning, hur ett långvarigt avbrott påverkar nätet runt omkring och ifall det lönsamt att ersätta eller laga viss utrustning vid fel. Studera hur dessa risker påverkar och samverkar med riskerna i denna rapport.

9 Referenser

Abdulahovic, Tarik (2009). *Analysis of High-Frequency Electrical Transients in Offshore Wind Parks*. Lic.-avh. Chalmers Tekniska Högskola. Göteborg.

Alexander, R.W & Durfournet, D. (2008). *Transient Recovery Voltage (TRV) for High-Voltage Circuit Breakers*. ss. 1-40.

PDF-format. Tillgänglig:

< <http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/switchgear/TRVTutorial/TutorialTRVAlexander-Durfournet.pdf> >, Hämtad: 2009-05-06.

Das, J.C. (2003). Surge transference through transformers. *Industry Applications Magazine, IEEE*, vol. 9: 5. ss. 24-32.

Fakta om PSCAD/EMTDC. Tillgänglig: <<https://pscad.com/products/pscad/>>, Hämtad: 2009-09-15.

Garzon, Ruben D. (2002). *High voltage circuit breakers: design and applications* (Elektronisk) New York: Mercel Dekker. Tillgänglig: CRCnetBASE. (2009-04-06).

Glinkowski, Mietek, Gutierrez, Moises & Braun, Dieter (1997). Voltage Escalation and Reignition Behavior of Vacuum Generator Circuit Breakers During Load Shedding. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12: 1. ss. 219-226.

Greenwood, Allan (1991). *Electrical Transients in Power Systems – Second Edition*. New York: Wiley Interscience.

Helmer, J. & Lindmayer, M. (1996). Mathematical modeling of the high frequency behavior of vacuum interrupters and comparison with measured transients in power systems. *XVIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, vol. 1. ss. 323-331.

Kundur, Prabha (1994). *Power system stability and control*. New York: McGraw-Hill.

Nordin, Rolf (2006). *Vakuumbrytaren i Mellanspänningsnät*. Opublicerat manuskript. Vattenfall Utveckling AB.

Popov, M. (2002). *Switching Three-Phase Distribution Transformers with a Vacuum Circuit Breaker – Analysis of Overvoltages and the Protection of Equipment*. Ph.D. Thesis. Delft University of Technology.

Rao, Kondala B. & Gajjar, Gopal (2006). Development and application of vacuum circuit breaker model in electromagnetic transient simulation. *Baserad på bidrag vid Power India Conference 2006 IEEE*, ss. 1-7.

Roininen, Tomas, Sölver, Carl-Ejnar, Nordli, Helge, Bosma, Anne, Jonsson, Per & Alfredsson, Anders (2009). *Live Tank Circuit Breakers - Application Guide*. Ludvika, ss. 33-59. PDF-format. Tillgänglig: < [http://library.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/7662478d918fca3cc12575c500310072/\\$File/1HSM%209543%2023-02en%20Live%20Tank%20Circuit%20Breaker%20-%20Application%20Guide%20Ed1.1.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/7662478d918fca3cc12575c500310072/$File/1HSM%209543%2023-02en%20Live%20Tank%20Circuit%20Breaker%20-%20Application%20Guide%20Ed1.1.pdf) >, Hämtad: 2009-10-08.

SF₆ betydelse för miljön.

Tillgänglig: < <http://www.epa.gov/highwp/electricpower-sf6/basic.html> >, Hämtad: 2009-04-03.

Slade, Paul G (2008). *The vacuum interrupter: theory, design, and application* (Elektronisk) Boca Raton: CRC Press. Tillgänglig: CRCnetBASE. (2009-04-06).

Svensson, Mårten (2003). *Vakuumpkopplare för högspänning – En introduktion och marknadskartläggning*. Elforsk rapport 03:40.

Sölver, Carl-Ejnar (2000). *Elkopplare och säkringar i distributionsnät*. Opublicerat manuskript. Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för elteknik.

Telander, Stanton, Wilhelm, Mark & Stump, Keith (1988). Surge Limiters for Vacuum Circuit Breakers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 24: 4. ss. 554-559.

Wong, S.M., Snider, L.A. & Lo, E.W.C. (2003). Overvoltages and reignition behavior of vacuum circuit breaker. *6th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management*. Proceedings. ASDCOM 11 -14 November 2003; Hong Kong. ss. 653-658.

10 Appendix

10.1 Appendix A

Matlab kod för teoretiska beräkningar av synkrongeneratorns parametrar, förluster, strömmar och spänningar.

```
%Generator spänning
Un=660;
%Generatorns märkeffekt
Sb=500000;
%Transienta reaktans
Xpu=0.30;
%Vinkelfrekvens
w=2*pi*50;
%Strökapacitans för generator
C=0.020*10^(-6);
%Effektfaktor
cosphi=0.8;

%Toppvärdet fasspänning
Unph=Un*sqrt(2)/sqrt(3);
%Ström och toppvärdet av strömmen
Iab=Sb/Un/sqrt(3)
In=sqrt(2)*Iab
%Impedansen för generatorn
Zb=Unph/In

%Induktansen för generator. Försummar C
L1=Xpu*Zb/w

%Induktansen för generator. Försummar inte C
L2=Xpu*Zb/(Xpu*Zb*C*w*w+w)

%Klippström
Ich=5;

%Överspänning V
V=Ich*sqrt(L1/C)

%Spänningstransientens frekvens efter strömklippning utan återtändning
f=(1/(2*pi*sqrt(L1*C)))

%Maximalspänning utan återtändning med hög klippström
Um=sqrt((Unph.^2)+L1*(Ich.^2)/C);
Um_huvudmax=Um*sqrt(3)

%Maximalspänning efter en återtändning med hög klippström
ka=Um/Unph;
Umax_hog_klippstrom=(ka+2)*Un*sqrt(2)

%Generatorns aktiva effekt
P=Sb*cosphi;
```

```
%Statorförluster i generatorm
Ploss=P*0.02;
%Resistans i generator
R=Ploss/(3*Iab.^2)

%Grid beräkning
%Kortslutningseffekt för det inkommande nätet
Ug=11000;
Sk=50000000;
Xk=(Ug.^2)/Sk;
Rk=0.2*Xk
L=Xk/w
```


10.2 Appendix B

Inställningar av parametrar och komponenter i PSCAD/EMTDC.

The dialog box is titled "[newpi] Coupled Pi Section Transmission Line". The "Main Configuration" tab is selected. The fields are as follows:

T-LINE NAME	Skena
Enter Imped./Admit. Data in:	R,XI,Xc (Ohms)
Nominal PI or Coupled PI Model:	Coupled
Line Rated Frequency	50.0 [Hz]
Line Length	15 [m]
Enter 0 Seq Data, or Estimate:	Enter
Graphics Display	3 phase view

Buttons: OK, Cancel, Help...

Figur 10.1 Inställningar i trefas-pi-modellen för kablarna i PSCAD.

The dialog box is titled "[newpi] Coupled Pi Section Transmission Line". The "R, XI, Xc Data (Ohms)" tab is selected. The fields are as follows:

+ve Sequence Resistance	0.0000091 [ohms/m]
+ve Sequence Inductive Reactance	0.0002 [ohms/m]
+ve Sequence Capacitive Reactance	600 [Mohms*m]
Zero Sequence Resistance	0.00001 [ohms/m]
Zero Sequence Inductive Reactance	0.0004 [ohms/m]
Zero Sequence Capacitive Reactance	600 [Mohms*m]

Buttons: OK, Cancel, Help...

Figur 10.2 Inställningar av värdena i trefas-pi-modellen för kablarna i PSCAD.

The dialog box is titled "[xfmr-3p2w] 3 Phase 2 Winding Transformer". The "Configuration" tab is selected. The fields are as follows:

Transformer Name	
3 Phase Transformer MVA	1.5 [MVA]
Base operation frequency	50.0 [Hz]
Winding #1 Type	Delta
Winding #2 Type	Y
Delta Lags or Leads Y	Lags
Positive sequence leakage reactance	0.060 [pu]
Ideal Transformer Model	Yes
No load losses	0.005 [pu]
Copper losses	0.001 [pu]
Tap changer on winding	None
Graphics Display	3 phase view
Display Details?	No

Buttons: OK, Cancel, Help...

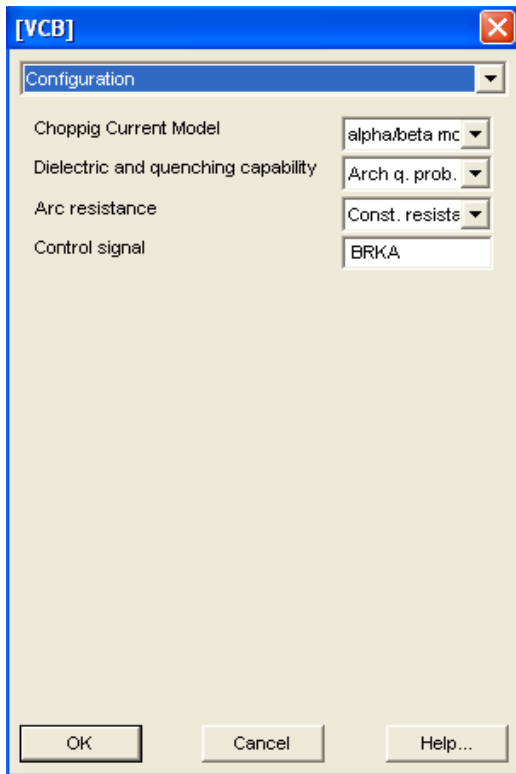
Figur 10.3 Inställningar i transformatormodellen i PSCAD.

The dialog box is titled "[xfmr-3p2w] 3 Phase 2 Winding Transformer". The "Saturation" tab is selected. The fields are as follows:

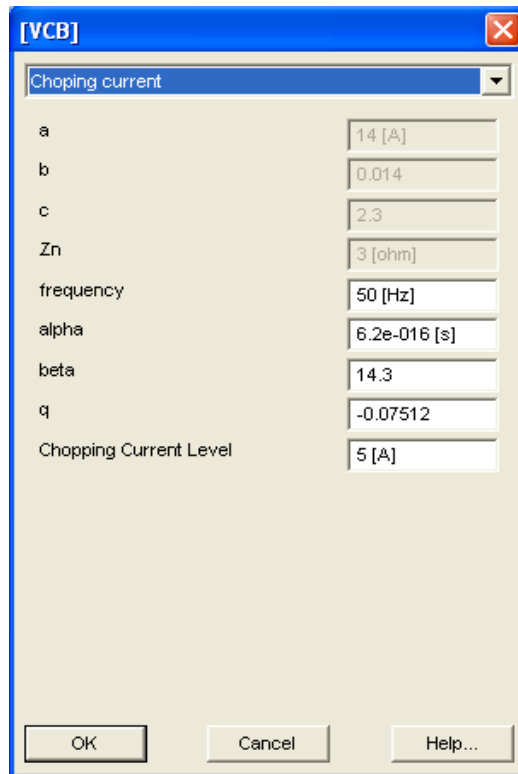
Saturation Enabled	No
Saturation Placed on Winding	#1
Air core reactance	0.2 [pu]
In rush decay time constant	1.0 [s]
Knee voltage	1.25 [pu]
Time to release flux clipping	0.1 [s]
Magnetizing current	2.0 [%]

Buttons: OK, Cancel, Help...

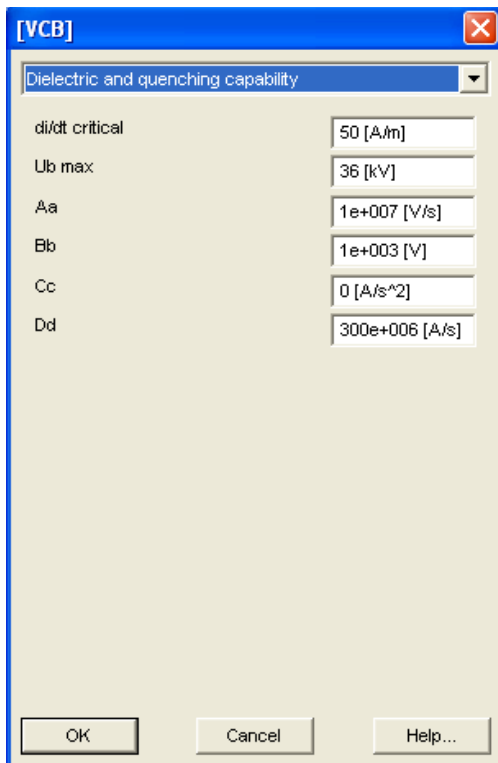
Figur 10.4 Inställningar i transformatormodellen i PSCAD.



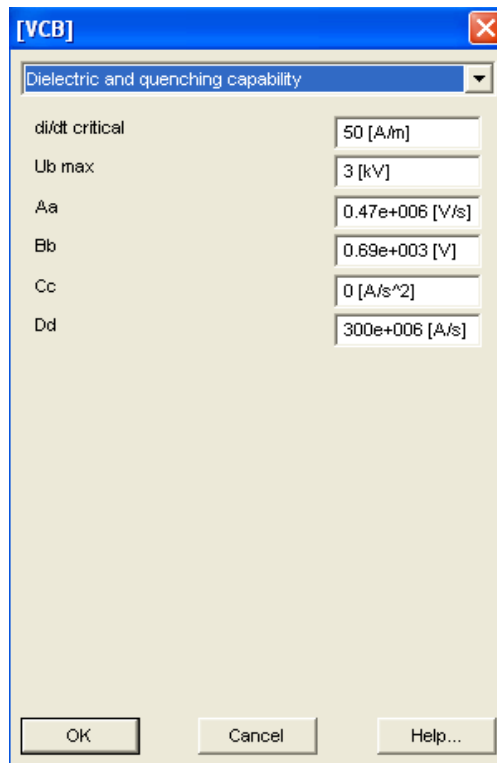
Figur 10.5 Inställningar i vakuumbrytarmodellen.



Figur 10.6 Inställningar av strömklippning i vakuumbrytarmodellen.



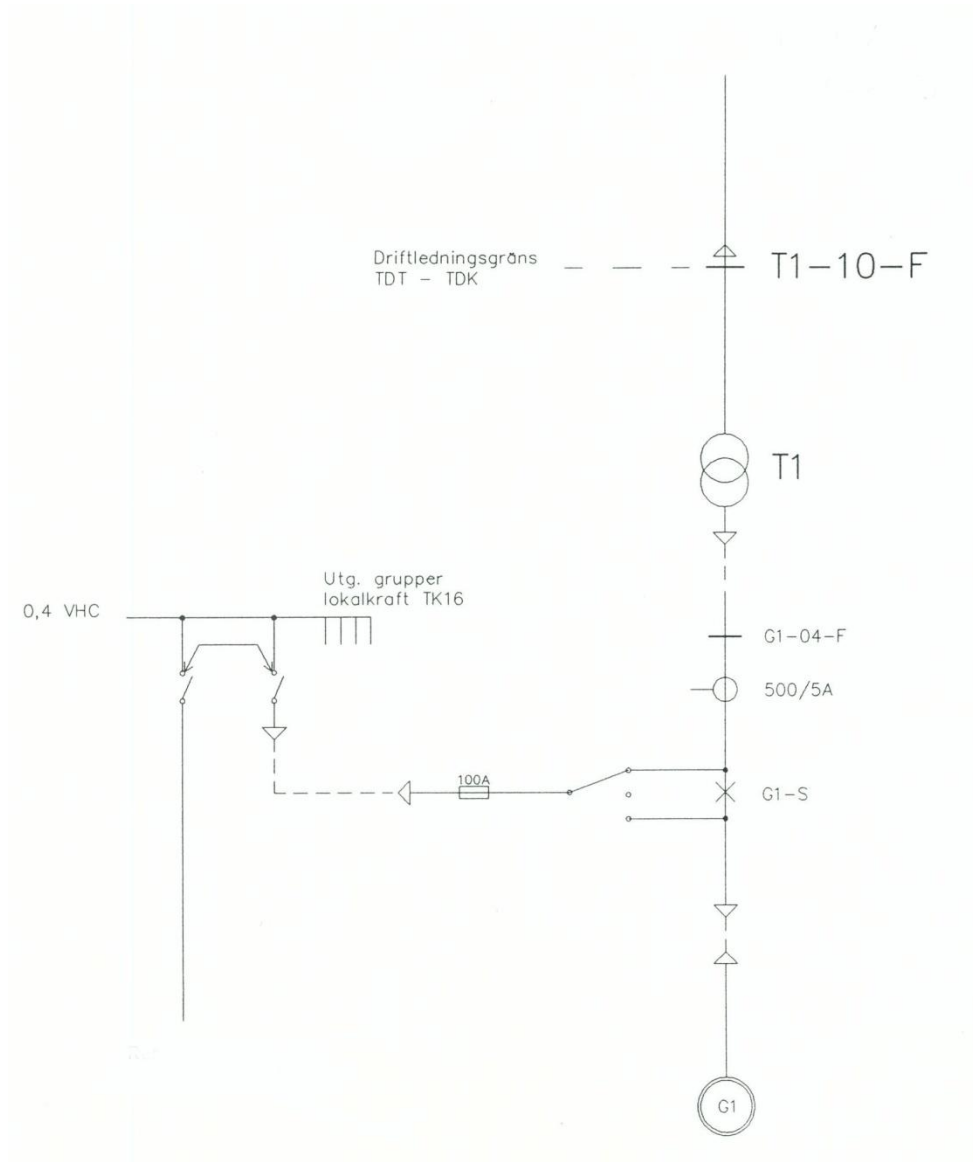
Figur 10.7 Inställningar av spänningshållfasthet och förmågan att bryta högfrekventa strömmar i vakuumbrytarmodellen för driftspänningarna ($\geq 3,6$ kV), konstruktionsspänning 7,2 kV för det här fallet.



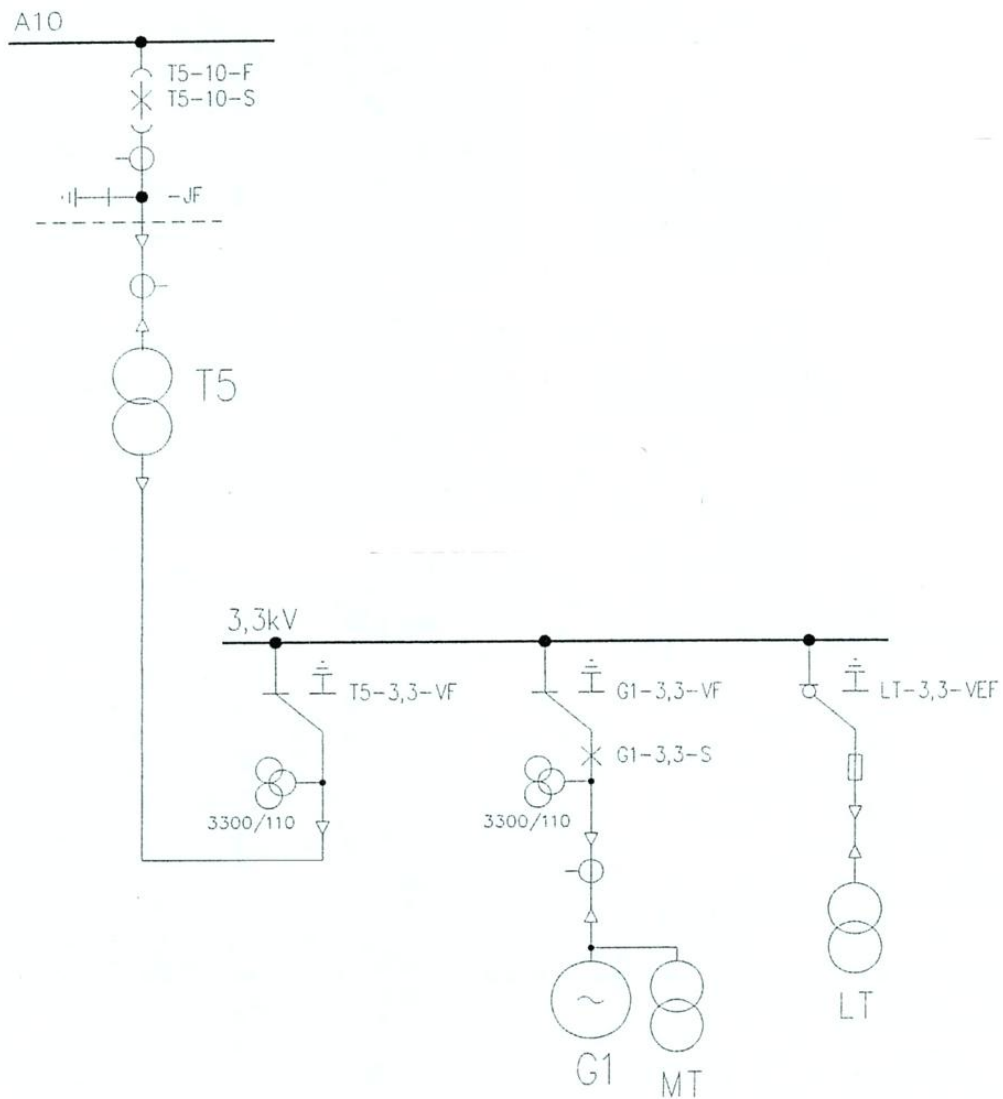
Figur 10.8 Inställningar av spänningshållfasthet och förmågan att bryta högfrekventa strömmar i vakuumbrytarmodellen för lågspänning ($\leq 1,0$ kV).

10.3 Appendix C

TVå stycken typiska stationsutformningar av småskaliga vattenkraftstationer för lågspänning och driftspänningen 3,6 kV.



Figur 10.9 Typisk uppbyggnad av en småskalig vattenkraftstation för lågspänning med en synkrogenerator och en effektbrytare placerad vid nerspänningssidan av transformatorn.



Figur 10.10 Typisk uppbyggnad av en småskalig vattenkraftstation för konstruktionsspänning 3,6 kV med en synkrogenerator och en generatorbrytare placerad vid nerspänningssidan av transformatorn.

10.4 Appendix D

Märkspänning för synkron-generator [kV]	Märkeffekt generator [kVA]	Andra generatoren i samma station [kVA]	Tredje generatoren i samma station [kVA]	Fjärde generatoren i samma station [kVA]
Brytare vid nerspänningssidan av transformatorn utom när spänningen är angiven efter generator effekten, då finns brytare även vid uppspänningssidan av transformatorn.				
0,4	60	170		
	105	155	155	
	160	240		
	280			
	330			
	350			
	500	500	1800 vid 3,3 kV	
	500	775	900	180 vid 0,23 kV
	530	740	840 vid 6 kV	950 vid 6 kV
	540			
	540			
	750	800		
	850			
	1200			
	200 asyn 1220 asyn			
0,66	518	518		
	1270			
	1700	1700		
	1800 asyn			
3,3	620			
5	500	650	3 st 1250	1650 vid 3 kV
Brytare vid uppspänningssidan av transformatorn				
0,4	850			
	1180	1300	2100	
2,5	1320	2250		
3,3	850			
	2400	2400		
	2500	2500		
	3600			

10.5 Appendix E

Värden från simuleringar för olika stationsutformningar.

Tabell 10.1 100 kVA synkrogenerator 0,4 kV, transformator 11/0,4 kV 0,315 MVA. Klippström 3 A.

Strökapacitans [nF]	Spänning vid synkrogenerator [kV]	Spänning vid nerspänningssidan av transformator [kV]
10	2,75	0,89
20	2,24	0,89
40	1,79	0,90
60	1,55	0,89
80	1,45	0,90
100	1,37	0,90
125	1,29	0,90
150	1,23	0,90
175	1,19	0,73
200	1,13	0,66

Tabell 10.2 100 kVA synkrogenerator 0,4 kV, transformator 11/0,4 kV 0,315 MVA. Klippström 5 A.

Strökapacitans [nF]	Spänning vid synkrogenerator [kV]	Spänning vid nerspänningssidan av transformator [kV]
10	4,36	0,66
20	3,21	0,66
40	2,53	0,66
60	2,20	0,66
80	1,99	0,66
100	1,85	0,66
125	1,73	0,66
150	1,60	0,66
175	1,52	0,84
200	1,48	0,84

Tabell 10.3 500 kVA synkrogenerator 0,66 kV, transformator 11/0,66 kV 1,0 MVA. Klippström 5 A

Strökapacitans [nF]	Spänning vid synkrogenerator [kV]	Spänning vid nerspänningssidan av transformator [kV]
10	3,70	0,96
20	3,00	0,97
40	2,43	0,96
60	2,16	0,96
80	2,03	0,97
100	1,97	0,97
125	1,83	0,97
150	1,75	0,97
175	1,70	0,97
200	1,65	0,96

Tabell 10.4 500 kVA synkrogenerator 3,6 kV, transformator 12/3,6 kV 800 kVA. Klippström 5 A.

Strökapacitans [nF]	Spänning vid synkrogenerator [kV]
10	15,00
20	14,38
30	13,46
40	12,78
60	11,77
80	11,17
100	10,71
125	10,25
150	9,90
175	9,65
200	9,31

Tabell 10.5 550 kVA synkrogenerator 3,6 kV, transformator 12/3,6 kV 600 kVA. Klippström 5 A.

Strökapacitans [nF]	Spänning vid synkrogenerator [kV]
10	14,40
20	13,69
40	12,26
60	11,47
80	10,85
100	10,37

Tabell 10.6 600 kVA synkrogenerator 3,6 kV, transformator 12/3,6 kV 600 kVA. Klippström 5 A.

Strökapacitans [nF]	Spänning vid synkrogenerator [kV]
10	13,56
20	12,87
40	11,96
60	11,23
80	10,71
100	10,28

125	10,03
150	9,73
175	9,48
200	9,27

125	9,89
150	9,57
175	9,35
200	8,97

Tabell 10.7 600 kVA synkrongenerator 3,6 kV, transformator 12/3,6 kV 800 kVA. Klippström 5 A.

Tabell 10.8 500 kVA synkrongenerator 5 kV, transformator 21/5 kV 800 kVA. Klippström 3 A.

Strökapacitans [nF]	Spänning vid synkron- generator [kV]
10	13,22
20	12,56
40	11,98
60	11,24
80	10,71
100	10,29
125	9,89
150	9,60
175	9,36
200	8,97

Strökapacitans [nF]	Spänning vid synkron- generator [kV]
5	18,22
10	17,92
20	16,16
40	14,26
60	13,36
80	12,73
100	12,35
125	11,96
150	11,67
175	11,44
200	11,12

Tabell 10.9 500 kVA synkrongenerator 5 kV, transformator 21/5 kV 500 kVA. Klippström 5 A.

Tabell 10.10 1,0 MVA synkrongenerator 5 kV, transformator 21/5 kV 1,0 MVA. Klippström 5 A.

Strökapacitans [nF]	Spänning vid synkron- generator [kV]
5	24,99
10	24,25
20	21,26
40	18,16
60	16,63
80	15,61
100	14,86
125	14,26
150	13,79
175	12,59
200	12,37

Strökapacitans [nF]	Spänning vid synkron- generator [kV]
10	17,18
20	16,50
40	14,98
60	13,93
80	13,35
100	12,93
125	12,53
150	12,20
175	11,94
200	11,72

10.6 Appendix F

Värden från simuleringarna när vakuumbrytaren placeras vid uppspänningssidan av transformatorn.

Tabell 10.11 850 kVA synkrogenerator, transformator 12/3,6 kV 850 kVA. Klippström 3 A.

Strökapacitans [nF]	Spänning vid uppspänningssidan av transformator [kV]
10	40,92
20	40,50
40	38,70
60	38,06
80	34,96
100	34,03
125	37,62
150	37,14
175	33,10
200	31,86

Tabell 10.12 850 kVA synkrogenerator, transformator 12/3,6 kV 1250 kVA. Klippström 3 A.

Strökapacitans [nF]	Spänning vid uppspänningssidan av transformator [kV]
10	37,75
20	37,40
40	37,20
60	36,84
80	36,36
100	36,22
125	36,03
150	32,89
175	32,43
200	32,44

Tabell 10.13 1000 kVA synkrogenerator, transformator 12/3,6 kV 1000 kVA. Klippström 3 A.

Strökapacitans [nF]	Spänning vid uppspänningssidan av transformator [kV]
10	38,90
20	38,50
40	36,90
60	36,38
80	36,61
100	32,81
125	32,34
150	35,72
175	31,81
200	34,72

Tabell 10.14 850 kVA synkrogenerator, transformator 12/3,6 kV 1250 kVA. Klippström 5 A.

Strökapacitans [nF]	Spänning vid uppspänningssidan av transformator [kV]
10	33,25
20	30,56
40	28,41
60	47,61
80	32,98
100	33,28
125	41,54
150	41,81
175	41,60
200	41,45

Tabell 10.15 1250 kVA synkrogenerator, transformator 12/3,6 kV 1250 kVA. Klippström 5 A.

Strökapacitans [nF]	Spänning vid uppspänningssidan av transformator [kV]
10	27,33
20	26,35
40	44,50
60	43,67
80	39,38
100	38,59

Tabell 10.16 2,0 MVA synkrogenerator, transformator 12/3,6 kV 2,0 MVA. Klippström 5 A

Strökapacitans [nF]	Spänning vid uppspänningssidan av transformator [kV]
10	39,78
20	43,50
40	43,48
60	37,83
80	41,47
100	38,11

125	37,43
150	36,77
175	36,00
200	36,16

125	40,91
150	37,08
175	40,55
200	32,46

Tabell 10.17 2,2 MVA synkrongenerator, transformator 12/3,6 kV 2,2 MVA. Klippström 5 A

Tabell 10.18 2,4 MVA synkrongenerator, transformator 12/3,6 kV 2,4 MVA. Klippström 5 A

Strökapacitans [nF]	Spänning vid uppspänningssidan av transformator [kV]
10	38,94
20	38,71
40	36,95
60	37,76
80	37,05
100	36,80
125	36,85
150	36,44
175	35,48
200	35,18

Strökapacitans [nF]	Spänning vid uppspänningssidan av transformator [kV]
10	37,55
20	37,41
40	36,19
60	35,56
80	36,34
100	36,04
125	36,03
150	35,64
175	34,96
200	31,22

Tabell 10.19 1,0 MVA synkrongenerator, transformator 22/3,6 kV 1,0 MVA. Klippström 5 A. Många återtändningar.

Strökapacitans [nF]	Spänning vid uppspänningssidan av transformator [kV]	Spänning vid synkrongenerator [kV]
10	101,72	16,10
20	107,07	16,45
40	90,62	12,38
60	101,47	23,18
80	87,95	13,13
100	115,19	31,70
125	85,90	12,93
150	78,04	13,35
175	81,70	11,60
200	74,39	13,98

Tabell 10.20 2,0 MVA synkrongenerator, transformator 22/3,6 kV 2,0 MVA. Klippström 5 A. Många återtändningar.

Strökapacitans [nF]	Spänning vid uppspänningssidan av transformator [kV]	Spänning vid synkrongenerator [kV]
10	120,06	17,75
20	122,32	19,94
40	112,84	19,35
60	94,00	13,99
80	115,87	21,25
100	106,28	19,27
125	66,18	9,24
150	66,08	9,48
175	66,85	9,24
200	58,30	10,30

Tabell 10.21 2,5 MVA synkrongenerator, transformator 22/3,6 kV 2,5 MVA. Klippström 5 A. Återtändningar.

Strökapacitans [nF]	Spänning vid uppspänningssidan av transformator [kV]	Spänning vid synkrongenerator [kV]
10	64,97	8,55
20	63,35	8,34
40	62,76	8,64
60	61,92	8,53
80	61,79	8,45
100	59,07	8,21
125	62,15	8,38
150	53,61	9,62
175	53,04	8,63
200	53,27	9,63

Tabell 10.22 1,5 MVA synkrongenerator, transformator 22/3,6 kV 1,5 MVA. Klippström 3 A. Återtändningar.

Strökapacitans [nF]	Spänning vid uppspänningssidan av transformator [kV]	Spänning vid synkrongenerator [kV]
10	124,57	17,26
20	132,06	18,24
40	116,40	17,27
60	115,00	19,40
80	65,60	9,00
100	55,20	8,04
125	65,96	8,71
150	65,09	8,90
175	101,94	21,00
200	63,02	9,10

Tabell 10.23 2,0 MVA synkrongenerator, transformator 22/3,6 kV 2,0 MVA. Klippström 3 A. Återtändningar på fas B.

Strökapacitans [nF]	Spänning vid uppspänningssidan av transformator [kV]	Spänning vid synkrongenerator [kV]
10	61,85	8,33
20	62,40	8,36
40	61,95	8,30
60	61,80	8,20
80	61,43	8,40
100	61,21	8,31
125	61,11	8,21
150	55,64	7,63
175	59,88	8,47
200	58,94	8,42

Tabell 10.24 1,0 MVA synkrogenerator, transformator 22/0,4 kV 1,0 MVA. Klippström 3 A. Återtändningar på flera faser.

Strökapacitans [nF]	Spänning vid uppspänningssidan av transformator [kV]
10	73,00
20	72,95
40	72,94
60	72,78
80	74,08
100	73,89
125	74,00
150	73,80
175	73,78
200	73,90

Tabell 10.25 1,5 MVA synkrogenerator, transformator 22/0,4 kV 1,5 MVA. Klippström 3 A. Återtändning på fas B.

Strökapacitans [nF]	Spänning vid uppspänningssidan av transformator [kV]
10	53,83
20	53,88
40	53,87
60	53,88
80	53,87
100	53,86
125	53,82
150	53,81
175	53,80
200	53,79

Tabell 10.26 1,25 MVA synkrogenerator, transformator 22/0,4 kV 1,25 MVA. Klippström 5 A. Återtändningar

Strökapacitans [nF]	Spänning vid uppspänningssidan av transformator [kV]	Spänning vid synkrogenerator [kV]
10	75,76	1,12
20	80,62	1,17
40	80,60	1,17
60	80,49	1,17
80	80,38	1,17
100	75,95	1,12
125	75,67	1,12
150	75,67	1,12
175	75,67	1,12
200	74,35	1,10

Tabell 10.27 2,0 MVA synkrogenerator, transformator 22/0,4 kV 2,0 MVA. Klippström 5 A. Återtändningar

Strökapacitans [nF]	Spänning vid uppspänningssidan av transformator [kV]	Spänning vid synkrogenerator [kV]
10	68,87	1,00
20	68,88	1,00
40	68,87	1,00
60	68,91	1,00
80	68,90	1,00
100	68,90	1,00
125	68,88	1,00
150	68,78	1,00
175	68,88	1,00
200	68,78	1,00