

2015-01-16



# Utredning av variablerna som påverkar storleken på brytspänningen i lindningskopplare

Andreas Andersson

**EXAMENSARBETE**  
Elektroingenjör med inriktning mot Elkraft  
Institutionen för ingenjörsvetenskap

# EXAMENSARBETE

## Utredning av variablerna som påverkar storleken på brytspänningen i lindningskopplare

### Sammanfattning

Brytspänningen är den spänning som uppkommer när överkopplingsmotståndet i lindningskopplaren lämnar sitt föregående läge vid omkoppling. Storleken på brytspänningen i lindningskopplaren beror på hur stor läckinduktansen är. Är den inte känd så kan brytspänningen istället beräknas med hjälp av FEM-programmet ACE (internt ABB-program) i samband med Mathcad. I ACE beräknas först reaktanserna i p.u-enheter mellan lindningarna och hur stora de är beror på lindningslayouten. Det är tidskrävande att använda ACE och Mathcad och uppgiften är att utreda de parametrar som påverkar storleken på brytspänningen samt att ta fram en förenklad beräkning av densamma.

Genom simulering i ACE av en mängd olika lindningslayouter visar det sig snart att det är alltför många parametrar som påverkar reaktanserna. De förenklingar som trots det har tagits fram är lite för grova för att det ska vara pålitligt. Mathcad är än mer komplext med tunga beräkningar som inte är lätta att förenkla.

Arbetet har ändå gett mer kunskap om hur reaktanserna påverkas av geometrierna i lindningarna och kommer att vara till viss nytta, även om det inte gick att förenkla ACE- och Mathcadberäkningarna så som var tänkt.

<b>Datum:</b>	2015-01-16
<b>Författare:</b>	Andreas Andersson
<b>Examinator:</b>	Andreas Petersson
<b>Handledare:</b>	Pontus Sundqvist, ABB / Torbjörn Berg, Högskolan Väst
<b>Program:</b>	Elektroingenjör med inriktning mot Elkraft
<b>Huvudområde:</b>	Elektroteknik
<b>Poäng:</b>	15 högskolepoäng
<b>Nyckelord:</b>	Lindningskopplare, brytspänning, läckinduktans
<b>Utgivare:</b>	Högskolan Väst, Institutionen för ingenjörsvetenskap, 461 86 Trollhättan Tel: 0520-22 30 00 Fax: 0520-22 32 99 Web: www.hv.se

# **BACHELOR'S THESIS**

## **Investigation of the variables that affect the recovery voltage in tap-changers**

### **Summary**

The recovery voltage is the voltage that occur when the transition resistor in the tap-changer leaves its previous position during an operation cycle. The amplitude of the recovery voltage depends on the leakage inductance.

If the leakage inductance is unknown, the recovery voltage can instead be calculated using a FEM-program called ACE (internal ABB-program) in conjunction with Mathcad. First, the reactances between the windings are calculated in per unit (p.u) using ACE and they depend on the winding layout. It is time consuming to use ACE and Mathcad and the task has been to investigate the parameters that affects the recovery voltage and to develop a simplified calculation of it.

Through simulation using ACE of a number of different winding layouts one soon comes to the conclusion that there are simply too many parameters affecting the reactances. Although the simplified calculations that despite this has been developed, they soon prove to be too rough to be useful. Mathcad is even more complex with heavy calculations that are not easy to grasp.

However, this thesis has given more knowledge about the way the reactances are affected by the geometry of the windings, even though it was not possible to in a reasonable way simplify the calculation of ACE and Mathcad.

<b>Date:</b>	January 16, 2015
<b>Author:</b>	Andreas Andersson
<b>Examiner:</b>	Andreas Petersson
<b>Advisor:</b>	Pontus Sundqvist, ABB / Torbjörn Berg, University West
<b>Programme:</b>	Electrical Engineering, Electric Power Techonlogy
<b>Main field of study:</b>	Electric Engineering
<b>Credits:</b>	15 HE credits
<b>Keywords:</b>	Tap-changer, recovery voltage, leakage inductance
<b>Publisher:</b>	University West, Department of Engineering Science, S-461 86 Trollhättan, SWEDEN Phone: + 46 520 22 30 00 Fax: + 46 520 22 32 99 Web: www.hv.se
<b>Education level:</b>	first/second cycle

## **Förord**

Jag vill ge ett stort tack till min handledare Pontus Sundqvist och till Sören Petterson, pensionerad ABB-anställd, för deras goda hjälp och stöd.

Om inget annat anges så är bilderna från ABB eller egna.

## Innehåll

Sammanfattning .....	i
Summary.....	ii
Förord.....	iii
Nomenklatur.....	iv
1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Problembeskrivning.....	1
1.3 Syfte.....	2
1.4 Avgränsningar.....	2
2 Metod.....	3
3 Teori.....	4
3.1 Lindningskopplare .....	4
3.2 Lindningskopplartyper .....	4
3.2.1 Linjär .....	4
3.2.2 Plus/Minus.....	5
3.2.3 Grov/Fin.....	5
3.3 Läckinduktans.....	5
3.4 ACE .....	7
3.5 Mathcad.....	9
3.5.1 Indata till Mathcad .....	9
3.5.2 Utdata från Mathcad .....	10
4 Genomförande och resultat.....	13
4.1 ACE .....	13
5 Slutsatser.....	15
6 Framtida arbete.....	15
7 Källförteckning.....	16

## Nomenklatur

Slinga – Ett steg i lindningskopplaren som ändrar utspänningen motsvarande transformatorns stegspänning

# 1 Inledning

Examensarbetet har utförts på ABB Power Products Transformer/Components på kontoret för lindningskopplarkonstruktion i Ludvika.

## 1.1 Bakgrund

För att bibehålla en stabil spänning vid varierande last i ett nät behövs en lindningskopplare som sitter monterad i eller utanpå en krafttransformator. Lindningskopplaren har till uppgift att ansluta eller koppla bort lindningsvarv på reglerlindningen, vilket då resulterar i ändrad utspänning. Nätets spänning och annan nödvändig information mäts och kontrolleras av ett manöverdon som sitter på utsidan av transformatorn. Detta manöverdon styr lindningskopplaren och ger order om lindningsbyte när omständigheterna kräver det för att bibehålla den önskade utspänningen.

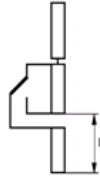
Denna omkoppling måste ske utan att strömmen bryts och utan att orsaka kortslutning mellan lindningarna. Därför kopplas överkopplingsmotstånd in just i överkopplingsögonblicket för att begränsa den cirkulerande strömmen som uppstår. På grund av den potentialskillnad som finns mellan slingorna så kan en ljusbåge uppstå vid omkoppling innan strömmen bryts. Det gäller att isolationshållfastheten är bra nog för att inte ljusbågen ska återtända. Återtändning innebär att ljusbågen inte släcks vid strömgenomgången då  $I=0$ . Detta kan dock ske ändå vid överlast [1].

## 1.2 Problembeskrivning

Idag finns det flera olika typer av transformatorer med en uppsjö av olika konstruktionslösningar. En transformator kan ha tre olika regleringsprinciper, en av dessa kallas grov/fin-reglering. När en lindningskopplare byter mellan två lindningsanslutningar i det nominella mittläget uppstår en så kallad brytspänning. Denna brytspänning kan skapa problem för lindningskopplaren som exempelvis långa ljusbågar vilket leder till ökat kontaktslitage och kontaminerad olja.

Normalt sett är denna spänning försumbart liten, men det är just i fallet när omkoppling sker mellan grov- och finlindningen (kallas även nominella mittläget) som en betydligt större brytspänning uppstår. Denna spänning påverkar vilken typ av lindningskopplare som är lämplig att använda. Därför används idag Mathcad och ett FEM-program kallat ACE för att beräkna denna spänning. Detta är ganska tidskrävande och mycket tid skulle besparas på att förenkla denna metod.

I de flesta fall så fyller kunden själv i den induktans som används för att beräkna brytspänningen i ABB's orderdatablad (se figur 1.1). Men ibland vet kunden inte hur stor den är och inte heller hur den beräknas. Då kan ABB själva beräkna brytspänningen enligt ovan, men då krävs mer information.

<b>AH</b> Leakage inductance	Specify the leakage inductance through the coarse and fine windings in series (L) <input type="text"/> mH	
<b>BA</b>		

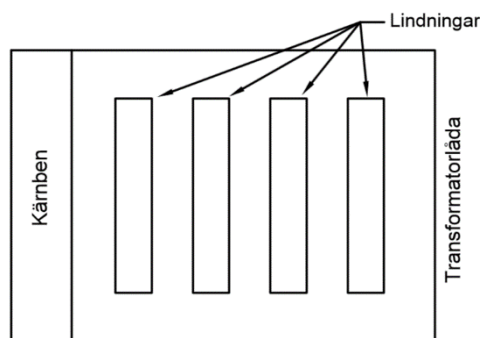
Figur 1.1. Kunden fyller i läckinduktansen genom grov- och finlindningen.

### 1.3 Syfte

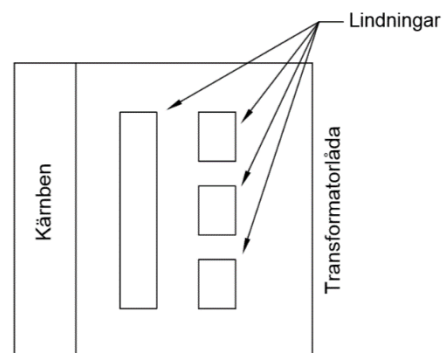
Utredningen går ut på att söka samband och hitta de parametrar som påverkar storleken på brytspänningen som lindningskopplaren utsätts för. Idag saknas detta samband, dock finns det idéer om vad som styr detta. Målet med detta examensarbete är att hitta dessa samband och att ta fram en teknisk anvisning som är lättanvänd och enkel och som kan användas av exempelvis marknadsförare och säljare gentemot kund. Denna anvisning ska vara en förenklad metod för beräkning av brytspänningen så att beräkning i ACE kan undvikas då detta är tidskrävande. Det kan också vara så att det helt enkelt inte finns något enkelt samband att finna som påverkar brytspänningen.

### 1.4 Avgränsningar

Det finns många olika lindningslayouter och lindningarna kan konstrueras antingen radiellt (se figur 1.1) eller axiellt (se figur 1.2). Arbetet var från början tänkt att innefatta både radiella och axiella konstruktionslösningar, men pga. tidsbrist så har fokus legat på radiell lösning då denna är den vanligaste typen. Lindningarna kan också placeras på många olika sätt och det finns även flera typer av ”hjälp-lindningar”. Även här har fokus legat på den vanligaste layouten, dvs. när lindningarna är placerade i den ordning som figur 3.7 visar.



Figur 1.1. Radiell lindningslayout.



Figur 1.2. Axiell lindningslayout.



Den Mathcad-fil som ABB använder sig av är framtagen av Sören Petterson, en pensionerad medarbetare på ABB. Denna fil är mycket komplex med bla. tunga matrisekvationer för att beräkna brytspänningen och rita grafer över brytningsförloppen. Försök har gjorts att tolka denna för att försöka göra en förenkling av den som hade kunnat samverka med den eventuella förenklingen av ACE-beräkningen, men utan större framgång. Tanken med att förenkla Mathcad-filen är för att ABB idag måste koppla upp sig mot en licensserver och de har inte alltid möjlighet till detta om de nu exempelvis skulle befinna sig ute hos kund.

Diskussion har förts med Sören via mail för att försöka förenkla Mathcadberäkningen utan att förlora för mycket av noggrannheten. Detta har till synes givit bra förenklingar där den beräknade brytspänningen stämmer bra överens med de beräkningar som vanligtvis görs med ACE och Mathcad. Men pga. att detta framkom under ett sent skede i examensarbetet så har inga större analyser och tester hunnits med av denna förenkling och kommer därför inte att behandlas i denna rapport.

## **2 Metod**

Många olika lindningsgeometrier har ritats i ABB's ACE-program. där beräkningarna har utförts med finita elementmetoden (FEM). ACE utför beräkningarna tvådimensionellt med axisymmetriska koordinater mellan två olika lindningar åt gången.

För en lindningslayout med fyra lindningar betyder detta att sex olika reaktanser fås fram.

Beräkningarna är genomförda med lindningar gjorda av koppar och som omges av varm transformatorolja. Detta för att erhålla optimalt resultat.

Reaktanserna från de olika geometrierna har sedan ställts mot varandra i Excel för att leta efter de parametrar som påverkar storleken på reaktanserna.

För att beräkna brytspänningen används Mathcad där indata är reaktanserna från ACE omräknat från per unit-värden (p.u) till verkliga reaktanser. De verkliga reaktanserna beräknas i ett Excelblad där reaktanserna från ACE och övrig information om transformatorn såsom spänning, ström och antal varv används.

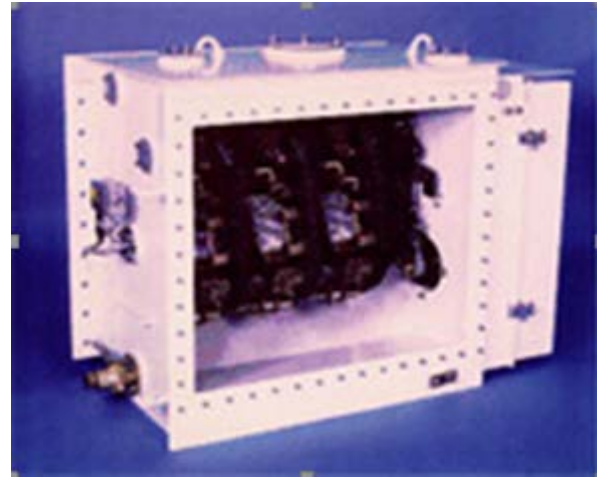
Dessa används sedan som indata i Mathcad och som utdata fås fyra olika kurvor som visar brytningsförlopp och brytspänningar.

## 3 Teori

### 3.1 Lindningskopplare

ABB har ett flertal olika lindningskopplarmodeller och har därför ett typbeteckningssystem för att särskilja dem. Figur 3.1 visar en lindningskopplare av typen UZ och denna typ sitter på utsidan av transformatorn. Det finns även andra typer, UB och UC, som då sitter inne i transformatorntanken.

Oavsett var de är placerade så har de eget kärl med olja för att det inte ska blandas med oljan i själva transformatorn. Anledningen är att det uppstår sot och gas från ljusbågen när lindningskopplaren opererar. Detta får inte komma in i transformatoroljan eftersom det försämrar isolationen.



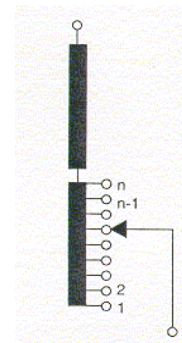
Figur 3.1. Lindningskopplarmodellen UZ.

Antalet slingor på lindningarna skiljer sig åt mellan olika transformatorer och vilken typ av lindningskopplare som kan används beror av detta antal då lindningskopplarna har begränsat antal positioner beroende på typ. Dessa kan variera från 5-35, men vanligast är 17-19. Reglerområdet ligger runt +/- 10-15 % av huvudspänningen där stegspänningen kan varieras mellan 0,5-2,5 % [1].

### 3.2 Lindningskopplartyper

#### 3.2.1 Linjär

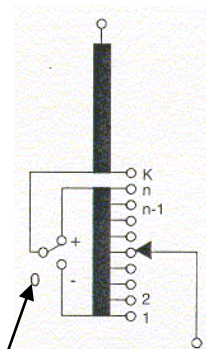
Den enklaste och billigaste konstruktionen där reglerlindningen är en del av stamlindningen. Problemet med denna typ är dock att det inte går att få så många positioner, eftersom lindningskopplaren och transformatorn då skulle bli mycket stor vilket inte är praktiskt. Reglerlindningen skulle också bli dyr att tillverka.



Figur 3.2. Schematisk bild av linjär kopplingstyp.

### 3.2.2 Plus/Minus

Jämfört med en linjär kopplartyp så blir antalet positioner i en plus/minus nästan dubbelt så många. Det beror på att förväljaren (se figur 3.3) kan ansluta reglerlindningen framlänges eller baklänges, vilket då resulterar i fler positioner. Reglerlindningen kommer under halva reglerområdet vara medkopplad i förhållande till stamlindningen. Under den andra halvan så byter förväljaren läge och nu motkopplas stamlindningen istället. Det innebär att strömmen genom de inkopplade stegen i reglerlindningen kommer att motverka magnetflödet från stamlindningen. Detta ger visserligen en sänkt utspänning som eftersträvas i detta läge, men nackdelen är att det också ger större belastningsförluster.



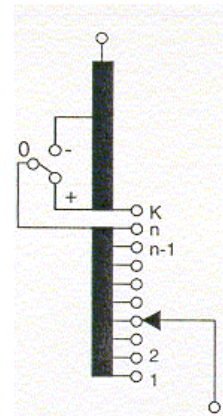
Figur 3.3. Schematisk bild av kopplingstypen plus/minus.

Förväljare

### 3.2.3 Grov/Fin

En transformator med grov/fin-reglering är konstruerad som så att den har en stamlindning samt ytterligare två lindningar som kan kopplas in var för sig eller i serie med varandra med hjälp av förväljaren (se figur 3.4). Grovlindningen har många slingor men bara två anslutningspunkter, en i vardera ände. Detta gör att den har en stor sammanlagd stegspänning och har därför fått namnet grovlindning.

Finlindningen däremot har lika många eller en mindre slinga än grovlindningen men har många fler anslutningspunkter för att finjustera utspänningen, därav namnet finlindning. Här motkopplas stamlindningen aldrig som i fallet med plus/minus.



Figur 3.4. Schematisk bild av kopplingstypen grov/fin.

Nackdelen är dock att vid omkoppling mellan grov/finlindningen så uppstår en brytspänning som skapar problem för lindningskopplaren och det är denna kopplingstyp som fokus har legat på i detta arbete.

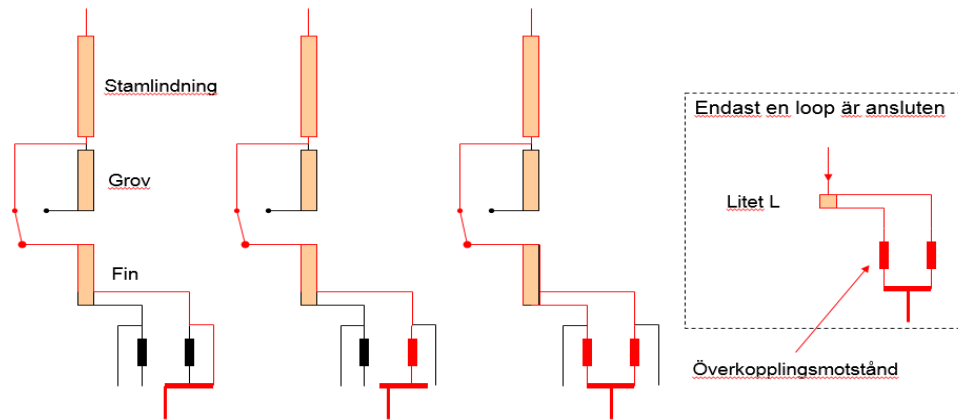
## 3.3 Läckinduktans

Läckinduktans är en induktiv komponent som är ett resultat av det magnetiska flöde som läcker ut från kärnan. Elektriskt sett motsvaras det av en induktiv impedans i serie med primärlindningen. Läckinduktansen härrör från en transformators elektriska egenskaper och motsvaras av grov- och finlindningens kortslutningsimpedans. Läckinduktansens storlek beror på transformatorns och lindningarnas geometri [2,3].

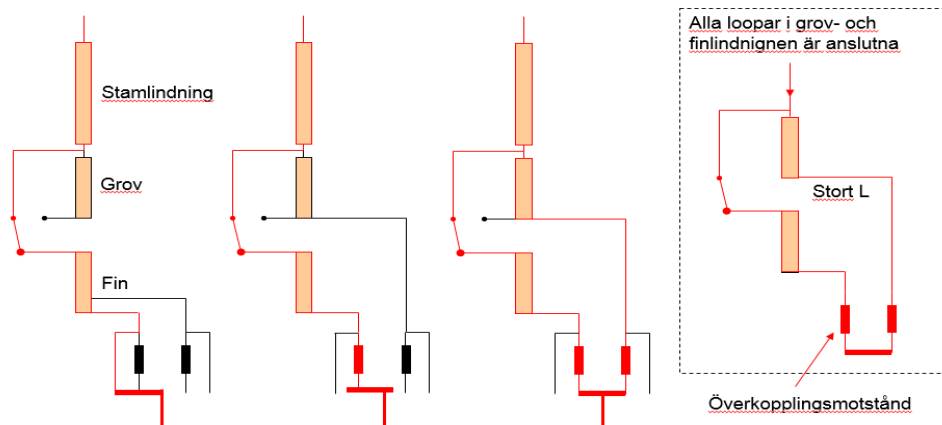
När en lindningskopplare utför en omkoppling så uppstår för ett ögonblick en ”kortslutning” mellan två slingor. Eftersom det är potentialskillnad mellan slingorna, motsvarande transformatorns stegspänning, så kommer en cirkulerande ström att uppstå mellan slingorna.

Denna ström kommer att ge upphov till mer läckinduktans, men är ändå försumbart liten (se figur 3.5). Det kritiska fallet är vid omkoppling mellan grov/fin då lindningarna för ett

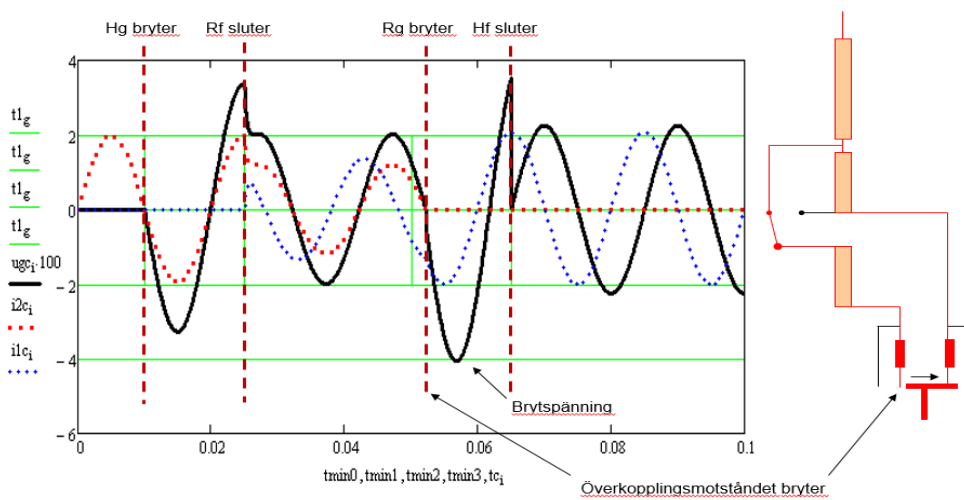
ögonblick ligger i serie med varandra (se figur 3.6). Det är denna omkoppling som ger upphov till en stor läckinduktans vilket medför en stor brytspänning över det första överkopplingsmotståndet. Figur 3.7 visar när den uppkommer under en omkoppling.



Figur 3.5. Normal omkoppling.



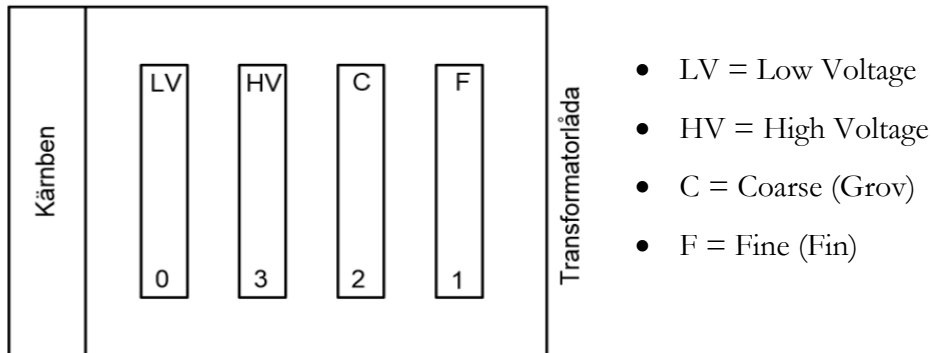
Figur 3.6. Omkoppling mellan grov- och finlindningen.



Figur 3.7. Brytspänningen under en omkoppling.

### 3.4 ACE

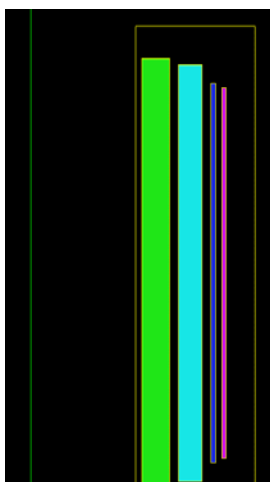
ACE är ABB's FEM-program och används för att beräkna läckinduktanser i transformatorer. FEM står för Finite Element Method och är en numerisk metod och används för att lösa partiella differentialekvationer med hjälp av datorer. Figur 3.8 visar en schematisk layout med ett typiskt exempel på hur lindningarna kan vara placerade runt kärnbenet. Lindningarna är placerade radiellt och tillges ett individuellt nummer för att kunna särskilja de reaktanser som kommer beräknas.



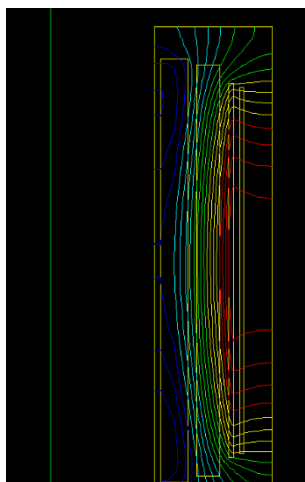
Figur 3.8. Lindningarnas placering runt kärnan i förhållande till varandra.

Måtten mellan lindningarna, tjocklek och avståndet mellan lindningarna och transformatorlådan är en nödvändighet för att kunna beräkna reaktanserna i ACE. Denna information ges ut av kunden.

Nedan visas ett exempel på hur det kan se ut när det ritas in i ACE. Här syns de fyra lindningarna omslutna av transformatorlådan och den lodräta gröna linjen representerar centrum på järnkärnan. Lindningarna tillges olika färger i programmet för att motsvara namnen som syntes ovan. Figur 3.10 visar det magnetiska flödet mellan grov- och lågspänningslindningen.



Figur 3.9. Radiell layout ritad i ACE.



Figur 3.10. Magnetflöde mellan grov- och lågspänningslindningen.

När lindningarna är ritade så kan reaktanserna beräknas. Principen är att den reaktiva effekten beräknas med två lindningar i taget (1). Dessa lindningar måste då ha s.k. amperevarvsbalans, vilket innebär att antalet varv på lindningarna inte behöver tas i beaktning (2) [4]. Detta ställs in i programmet.

$$Q = I^2 * X_L \quad (1)$$

$$I_1 * N_1 = I_2 * N_2 \quad (2)$$

Där

$I_x$  är strömmen

$N_x$  är antalet varv i lindningarna

$Q$  är den reaktiva effekten

$X_L$  är läckflödesreaktansen.

Reaktanserna som räknas fram tillges ett index för att särskilja dem. Fyra olika lindningar medför därför sex olika reaktanser,  $X_{01}$ ,  $X_{02}$ ,  $X_{03}$ ,  $X_{12}$ ,  $X_{23}$ , och  $X_{13}$ .  $X_{01}$  är exempelvis reaktansen mellan lågspännings- och finlindningen. Reaktanserna fås ut i per-unit (p.u) och tabell 3.1 visar ett exempel på hur det kan se ut.

Tabell 3.1. Beräknade reaktanser från ACE.

Namn	Index	Beräknade reaktanser från ACE [pu]
LV-Fine	X01	1,3990E-04
LV-Coarse	X02	1,1745E-04
LV-HV	X03	3,4500E-05
Coarse-Fine	X12	3,8800E-05
Coarse-HV	X23	4,0200E-05
Fine-HV	X13	6,7700E-05

### 3.5 Mathcad

#### 3.5.1 Indata till Mathcad

När reaktanserna har beräknats måste de först räknas om till verkliga reaktanser innan de kan användas i Mathcad (se tabell 3.2). Detta görs enligt (3).

$$X_{xx} * (N_{Stam} + N_{Grov})^2 * \frac{I_{Nom}}{U_{Hvfas}} = X_{xxj} \quad (3)$$

Där:

$X_{xx}$  är de olika reaktanserna från ACE

$N_{Stam}$  är antalet varv på stamlindningen

$N_{Grov}$  är antalet varv på grovlindningen

$I_{Nom}$  är den nominella strömmen

$U_{Hvfas}$  är fasspänningen på högspänningssidan

$X_{xxj}$  är reaktanserna i komplex form.

Tabell 3.2. Reaktanserna från ACE omräknade till verkliga reaktanser.

Namn	Index	Beräknade reaktanser från ACE [pu]	Omräknade reaktanser för Mathcad $X_{xx}=0, \dots, j$
LV-Fine	X01	1,3990E-04	0,823
LV-Coarse	X02	1,1745E-04	0,691
LV-HV	X03	3,4500E-05	0,203
Coarse-Fine	X12	3,8800E-05	0,228
Coarse-HV	X23	4,0200E-05	0,236
Fine-HV	X13	6,7700E-05	0,398

De omräknade reaktanserna ska nu användas i Mathcad. Storleken på stegspänningen, antalet slingor och hurvida reglerlindningen och grovlindningen har samma antal varv är också nödvändig information i som krävs. Figur 3.11 visar indatan till Mathcad.

**INDATA**

Frekvens:       $\text{freq} := 50$      $w := \text{freq} \cdot 2 \cdot \pi$

1varvs-läckreaktanser mellan lindningarna i pu (sista raden gäller) :

$x_{03} := 0.20j$	$x_{13} := 0.08j$	$x_{12} := 0.05j$	$x_{01} := 0.11j$	$x_{23} := 0.14j$	$x_{02} := 0.05j$	0123
$x_{03} := 0.14j$	$x_{23} := 0.09j$	$x_{12} := 0.21j$	$x_{02} := 0.04j$	$x_{13} := 0.10j$	$x_{01} := 0.26j$	0231
$x_{03} := 0.10j$	$x_{23} := 0.10j$	$x_{12} := 0.05j$	$x_{02} := 0.22j$	$x_{13} := 0.16j$	$x_{01} := 0.28j$	0321
$x_{03} := 0.10j$	$x_{23} := 0.50j$	$x_{12} := 0.40j$	$x_{02} := 0.60j$	$x_{13} := 0.80j$	$x_{01} := 0.90j$	stam
$x_{03} := 1.0j$	$x_{23} := 1.0j$	$x_{12} := 1.0j$	$x_{02} := 1.0j$	$x_{13} := 1.0j$	$x_{01} := 1.0j$	

Varvtal i varje slinga, antal slingor merslinga i grovlindningen och varvtal i stamlindning:  
( $n \cdot dN = +$ -reglerområde (pu) )

$dN := 0.011$	$n := 17$	$s := 1$	$N := 1 - (n + s) \cdot dN$	$N = 0.802$	$n \cdot dN = 0.187$
					$(n + s) \cdot dN = 0.198$

Resistans i hjälpkontaktarna, UB och IB samt fasvinklarna  $\text{fiUB}$  och  $\text{fiIB}$  (rad) :

$R := 0.011$	$UB := 1$	$\text{fiUB} := 0 \cdot \frac{\pi}{180}$	$IB := 2$	$\text{fiIB} := \text{fiUB} \cdot \frac{\pi}{180}$
--------------	-----------	--	-----------	--

R är stegets storlek enl. orderblankett

Xt och Rt (ohm) i transformator med spänning  $U_n$  (V) över och ström  $I_n$  (A) i lindningar:

$$X_{t12} = x_{12} \cdot (n \cdot dN)^2 \cdot \frac{U_n}{I_n} \quad R_t = R \cdot \frac{U_n}{I_n}$$

Figur 3.11. Indata till Mathcad.

### 3.5.2 Utdata från Mathcad

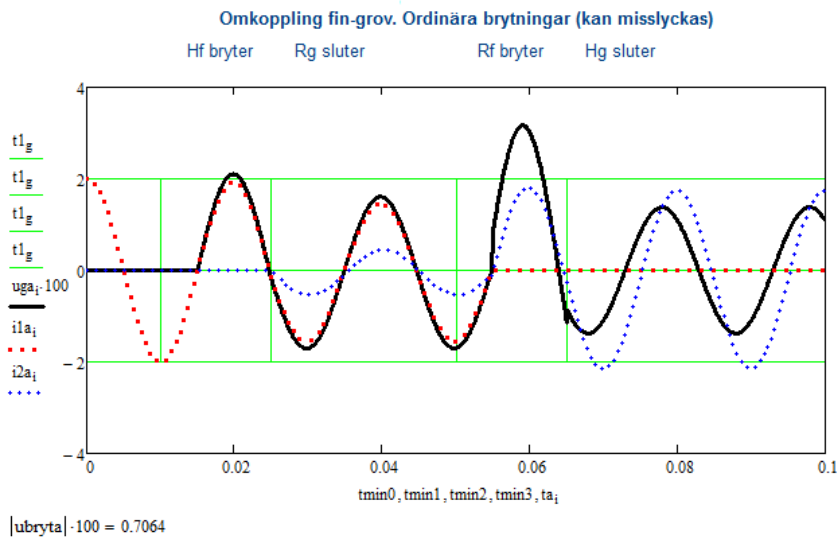
När all indata har samlats ihop och förts in i Mathcad-filen så beräknar programmet ut fyra olika värden med tillhörande kurvor som beskriver brytningsförloppet. Beräkningen utförs med bla. komplexa matriser och Case-satser. Anledningen till att det blir just fyra är för att det finns fyra olika brytningsförlopp.

- Brytning från  $\text{fin}$ - till grovlindning, ubryta (figur 3.12)
- Brytning från  $\text{fin}$ - till grovlindning med fördröjd slutbrytning, ubrytb (figur 3.13)
- Brytning från grov- till finlindning, ubrytc (figur 3.14)
- Brytning från grov- till finlindning med fördröjd slutbrytning, ubrytd (figur 3.15)

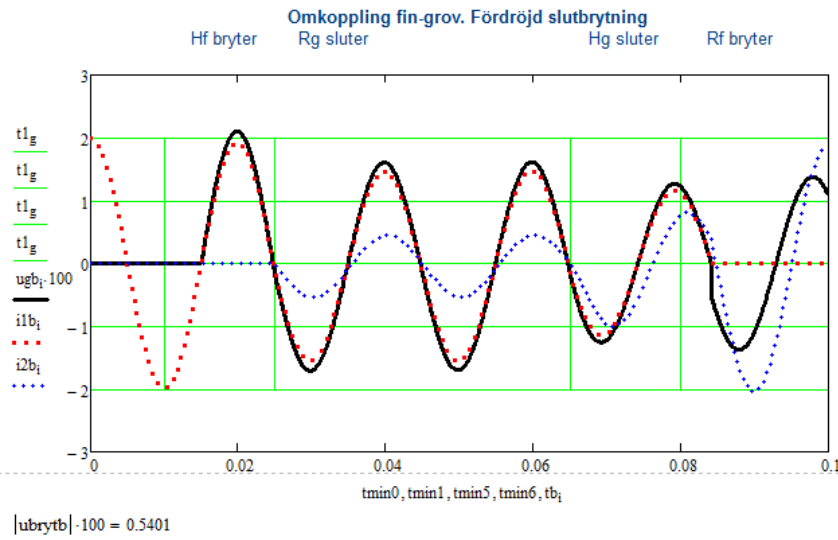
Normalt sett så bryts strömmen i strömgenomgången då  $I=0$ . Misslyckas detta och den istället bryts något senare så uppstår en ljusbåge som kommer att vara aktiv ända tills nästa strömgenomgång då denna släcks. Detta kallas för fördröjd slutbrytning.

Figurerna 3.12–3.15 visar de fyra olika brytförloppen med tillhörande värde på ubryt.

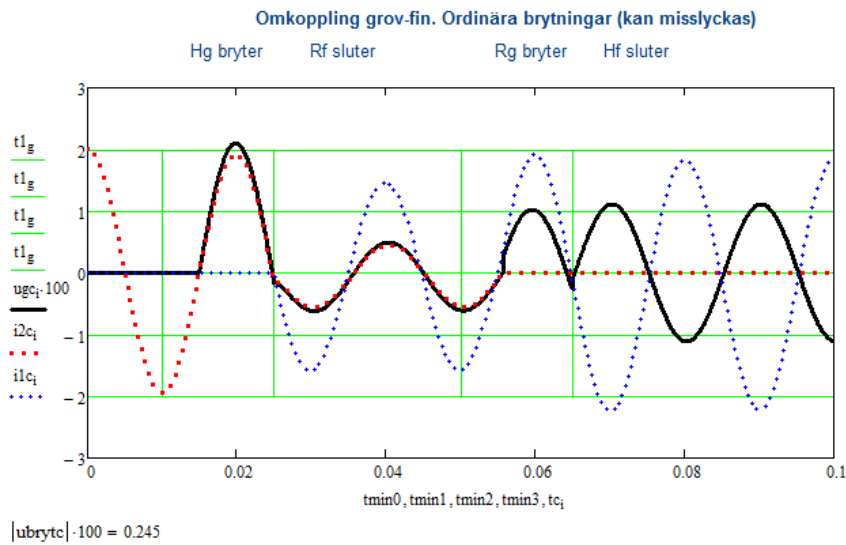




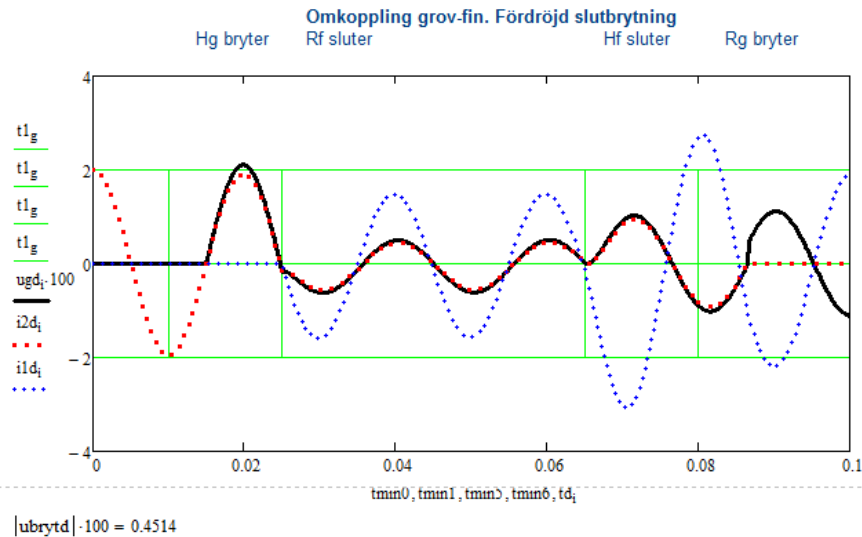
Figur 3.12. Brytförloppet för ubryta.



Figur 3.13. Brytförloppet för ubrytb.



Figur 3.14. Brytförloppet för ubrytc.



Figur 3.15. Brytförloppet för ubrytd.

Dessa värden, dvs ubryta, b, c och d är den procentuella brytspänningen relativt fasspänningen. När de har beräknats ska nu dessa värden slutligen räknas om till en brytspänning och det är toppspänningen som är intressant eftersom det är värsta fallet. Därför räknas fasspänningen först om till ett toppvärde och brytspänningen beräknas då enligt (4).

$$U_{hvfas} * \sqrt{2} * \frac{ubryt}{100} = U_{peak} \quad (4)$$

Där:

$U_{hvfas}$  är fasspänningen på högspänningssidan

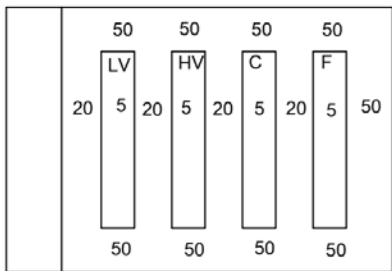
$ubryt$  är de fyra olika värdena från Mathcad

$U_{peak}$  är toppvärdet på brytspänningen.

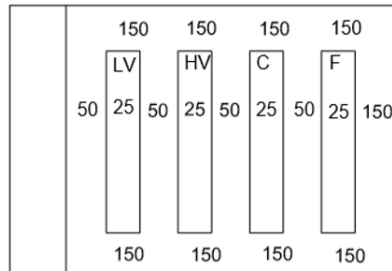
## 4 Genomförande och resultat

### 4.1 ACE

För att försöka förstå hur reaktanserna förändras så ritades först fem olika layouter upp i ACE. Siffrorna i figurerna nedan anger avstånden och tjocklekar i mm. Figur 4.1 är den minsta och måtten ökar succesivt för de andra layouterna ända upp till den största, figur 4.2.

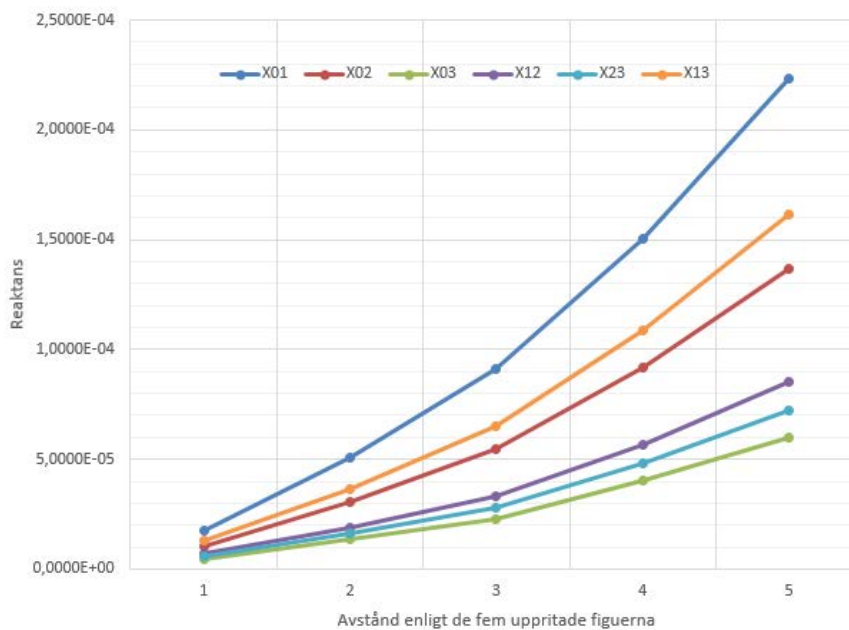


Figur 4.1. Den minsta lindningslayouten.



Figur 4.2. Den största lindningslayouten.

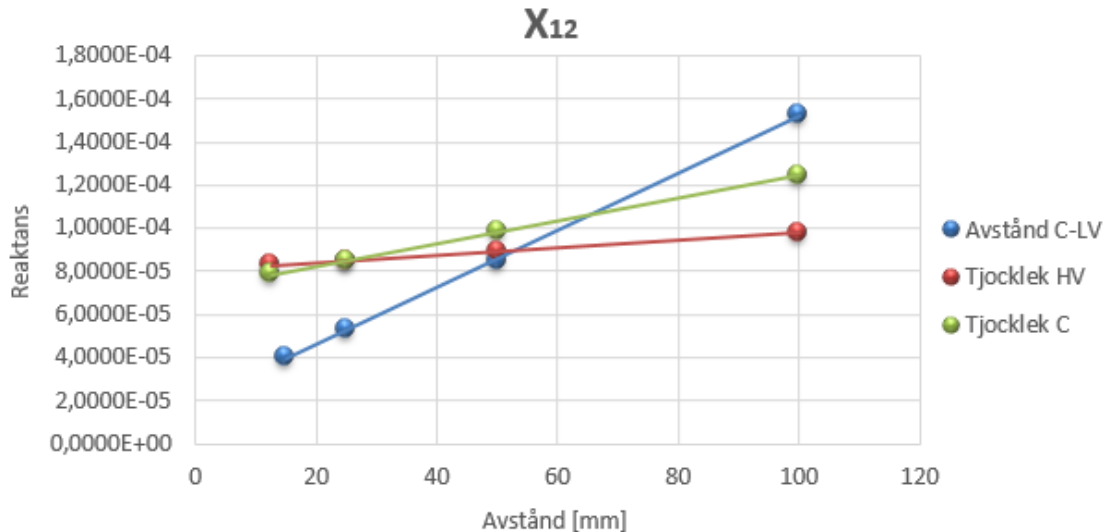
Reaktanserna som beräknades ställdes mot varandra i Excel och plottades i en graf. Det visade sig att om alla mått ökar så ökar också reaktanserna exponentiellt, se figur 4.3.



Figur 4.3. Reaktanserna i förhållande till avstånden.

Med figur 4.2 som utgångspunkt så provades sedan att ändra endast ett av måtten åt gången (exempelvis en tjocklek eller avstånd) för att sedan jämföra dem sinsemellan. Samma mått ändrades också flera gånger för att se hur det påverkade reaktanserna i en graf. Proceduren upprepades för en mängd olika mått.

Detta medförde dock en mycket stor mängd med olika layouter med respektive reaktanser. Dessa tas inte med här med anledning av att det skulle ta alldeles för mycket plats. Men ett exempel är figur 4.4 där fyra olika avstånd mellan grov- och finlindningen, tjockleken på HV och tjockleken på C ritades upp och sedan plottades. Alla andra mått var fasta och det visar sig att när endast ett mått ändras så ökar reaktansen linjärt. Tanken är att försöka få fram en formel för att beräkna de sex olika reaktanserna när måtten är kända.



Figur 4.4. Reaktansens förändring vid olika förhållanden.

Tar vi nu reaktansen  $X_{12}$  som exempel enligt figuren ovan så ser man snart att det inte är enbart avståndet mellan just grov- och finlindningen som påverkar  $X_{12}$  utan det är fler faktorer inblandade. Figuren visar att även tjockleken på lindningarna påverkar  $X_{12}$ .

Detta resulterar i alltför många geometriska parametrar som påverkar reaktanserna för att det ska vara genomförbart att på en rimlig nivå få fram någon förenklad formel att beräkna reaktanserna med där måtten är kända.  $X_{01}$  är snäppet värre, där är det nämligen alla avstånd och tjocklekar på lindningarna som ligger mellan LV och finlindningen som påverkar och det krävs att alla sex reaktanser beräknas för att få fram en brytspänning.

Det som med säkerhet kan försummas är avstånden mellan lindningarna och transformatorlådan. Det visade sig att när endast detta avstånd ändrades så påverkades inte reaktanserna nämnvärt.

## **5 Slutsatser**

Min slutsats är att det är alltför många geometriska parametrar i layouterna som påverkar reaktanserna för att det ska vara genomförbart att få fram en rimlig förenklad ekvation i Excel för att beräkna dessa. Försök har ändå gjorts att få fram en formel där enbart avstånden mellan lindningarna användes eftersom de förhållandena var linjära. Det blir ändå ganska bra grovt sett, men i kombination med att Mathcad-filen är för komplex för att förenkla så spelar det egentligen ingen roll eftersom de är beroende av varandra för att få fram en brytspänning.

## **6 Framtida arbete**

Framtida arbete kan vara att utreda hur beräkningen av brytspänningen för andra typer av lindningslayouter kan förenklas. Exempelvis axiell layout och layouter där det finns hjälplindningar eller tertiärlindningar.

En analys och implementering av de förenklingar av Mathcad-filen som getts av Sören ser ut att ha goda förutsättningar för att i slutändan få fram det som ABB söker och ett framtida arbete av just detta skulle passa bra.

## **7 Källförteckning**

1. G. Andersson, Grundläggande introduktion om lindningskopplarteori. Ludvika: ABB Components, 2002
2. A. Krämer, On-Load Tap-Changers for Power Transformers: Operation Principles, Application and Selection, Utgåva 3000. Regensburg: Maschinenfabrik Reinhausen, 2000
3. Leakage inductance. [Elektronisk]. Tillgänglig:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Leakage\\_inductance](http://en.wikipedia.org/wiki/Leakage_inductance) [2015-01-14]
4. P. Sundqvist, Technical guidelines: Calculation of leakage inductance using ACE and Mathcad, Rev 1. Ludvika: ABB Components, 2012