



EXAMENSARBETE INOM ELEKTROTEKNIK
STOCKHOLM 2014

Utveckling av laboration om trefastransformatorn

En studie om transformatorer

MOHAMMED AL-BREIHI

Utveckling av laboration om trefastransformatorn

En studie om transformatorer

Development of three phase transformer lab

A study about transformers

Mohammed Al-Breih

Examensarbete inom
Datorteknik/Elektroteknik,
Grundnivå, 15 hp
Handledare på KTH: Anna Josefsson
Examinator: Thomas Lindh
TRITA-STH 2014-64

KTH
Skolan för Teknik och Hälsa
136 40 Handen, Sverige

Sammanfattning

Examensarbetet har utförts på uppdrag av enheten för Data- och Elektroteknik på skolan för Teknik och Hälsa, KTH.

Denna studie om transformatorer omfattar deras funktioner och användningsområden, hur de är uppbyggda, hur kärnan och lindningarna som är transformatorns viktigaste delar är uppbyggda, vilka materiel som används vid konstruktion av dessa samt vilka typer det finns av dem beskrivs i rapporten. Vidare beskrivs flera olika transformator typerns funktioner och användningsområden. Eftersom en viktig del av studien varit på vilka sätt transformatorer kan utvecklas för ökad miljövänlighet och livslängd går rapporten igenom olika vegetabiliska oljor, vilka fördelar de har gentemot mineraloljor och vilka egenskaper de har samt på vilket sätt de är skonsammare mot miljön. HVDC-enheter transformerar höga spänningar från växelspänning till likspänning för mindre resistiva förluster och därmed lägre energiförluster vilket i sin tur leder till en renare miljö.

Teorigenomgången av transformatorn ligger till grund för utformningen av en laboration för undervisningsbruk, bl.a. i en kurs om elkraftteknik som ges i högskoleingenjörsprogrammet Elektroteknik på KTH.

Abstract

This degree project was carried out on behalf of the unit for Computer and Electrical engineering at the School of Technology and Health, KTH.

This study about transformers, their function and uses, the way they're built, how the core and windings, which are the most important parts of a transformer, are made and what kind of materials are used to make them. Several types of transformers and their functions are described. A crucial part of the study has been to search for different ways to develop transformers to make them environmentally safer and to increase their life-span. As such this work describes different transformer oils, what advantages and disadvantages they have compared to mineral oils, what properties they have and in what way they're less harmful for the environment. HVDC units transform high voltages from Alternating Current to Direct Current to lessen the resistive losses and energy losses which lead to a cleaner environment.

The theory examination of the transformer is the basis for the formation of a lab for educational use, among others in a course about electrical power that's included in Bachelor of Science in Electrical Engineering at KTH.

Innehållsförteckning

1. Inledning	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Målformulering	1
1.3 Lösningmetoder	1
1.4 Avgränsningar	2
2. Teori	3
2.1 Transformatorn	3
2.2 Transformatorns uppbyggnad	4
2.2.1 Trefastransformatorns uppbyggnad	4
2.2.2 Transformatorns kärna	5
2.2.3 Kärntyper.....	5
2.2.4 Järnkärnans materiel och uppbyggnad	6
2.2.5 Transformatorns lindningar	6
2.2.6 Kylning av transformatorn	7
2.2.7 Transformatorolja	8
2.2.8 Kontroll via temperaturvakter	10
2.2.9 Kontroll av gasbildning med gasvakt.....	10
2.3 Transformator typer	11
2.3.1 Krafttransformatorer	11
2.3.2 Distributionstransformatorer.....	12
2.3.3 Autotransformatorer.....	12
2.3.4 Reglertransformator	13
2.3.5 Oljeisolerade och torrisolerade transformatorer	13
2.3.6 Mättransformatorer.....	14

2.3.6.1	Konstruktion av strömtransformatorer	17
2.4	Olika kopplingssätt	18
2.4.1	Y-koppling.....	18
2.4.2	D-koppling	20
2.5	Utveckling av transformatorn	22
2.5.1	Isoleringsoljor.....	22
2.5.2	High Voltage Direct Current – HVDC-enheter.....	25
2.6	Vanliga felorsaker.....	26
2.7	Instuderingsfrågor.....	29
3.	Analys av laborationsresultat.....	31
3.1	Test och analys av laborationsuppgifter	31
3.2	Tomgångs- och kortslutningsprov.....	31
3.3	Y-Y-koppling vid tomgång	33
3.4	Y-Y-koppling med resistiv last	35
3.4.2	Analys av spänningsfallet vid resistiv last	36
3.5	Resultat vid induktiv belastning	37
3.6	Y-D, D-D och D-Y-koppling vid tomgång.....	39
3.7	Ändring av förskjutningen manuellt.....	41
4.	Genomförande	43
4.1	Arbetsmetodik.....	43
4.2	Examensarbetets originalmål.....	43
4.3	Transformatorstudie	44
4.4	Utveckling av laborationsuppgifterna	44
5.	Analys	47
5.1	Laborationsuppgifter.....	47

5.2 Transformatorns utveckling	47
5.3 Problemanalys.....	48
5.3.1 Problem med utformning av laborationsuppgifter	48
6. Resultat och diskussion	49
7. Slutsats	51
8 Framtida vidareutveckling.....	53
Källor	55
Referenser	55
Appendix 1	57
1. Inledning.....	58
2 Transformatorn	58
2.1 Transformatordata	58
3. Enfastransformatorn	59
3.1 Bestämning av transformatorns omsättning i tomgång	59
3.2 Kortslutningsprov av transformatorn	61
4. Trefastransformatorn.....	62
4.1 Y-Y-koppling vid tomgång	62
4.2.2 Y-Y-koppling med induktiv last.....	65
4.2.3 Y-Y-koppling med kapacitiv last	66
4.2.4 Y-Y-koppling med induktiv och kapacitiv last.....	67
4.3 Y-D-koppling vid tomgång	68
4.4 D-D-koppling vid tomgång	68
4.5 D-Y-koppling vid tomgång	69
4.6 Manuell fasförskjutning av trefastransformatorn (extra).....	70
5. Förberedelseuppgifter	71

Bilaga 1.....	73
Bilaga 2.....	75

1. Inledning

1.1 Bakgrund

För närvarande ingår det ett antal laborationer i kursen "Elkraftteknik I" som ingår i högskoleingenjörsprogrammet Elektroteknik på KTH. Målet med det här examensarbetet är att ta fram en undervisningsmodul med laboration och tillhörande teori om transformatorn avsedd att användas i kursen.

Eftersom det är viktigt att ta hänsyn och hand om miljön i dagens samhälle bestämdes det att en studie om transformatorn ska göras. Studien går igenom vilka olika transformator typer det finns samt deras funktioner och användningsområden. Även forskning kring utveckling av transformatorer, både livslängd- och miljömässigt, inför framtiden ingår i studien.

1.2 Målformulering

Målet med examensarbetet är att utveckla en undervisningsmodul med laborationsuppgifter som ger studenterna ny förståelse för transformatorn. Laborationen ska ha varierande uppgifter som samtidigt hänger ihop med det som studenten lärt sig under kursens gång. Vidare ska en del av uppgifterna vara nya och ej ha ingått i nuvarande laboration.

Studien om transformatorn ska ge svar på vilka metoder som kan användas för att utveckla transformatorn för en ökad livslängd och minskad miljöpåfrestning.

1.3 Lösningmetoder

Genom att analysera nuvarande laborationsuppgifter samt kursmaterial och övningsuppgifter som studenten förväntas kunna komma de nya laborationsuppgifterna tas fram. Studien utförs genom informationssökning i kurslitteratur, handböcker och intervjuer med exempelvis doktorander inom ämnet.

Transformatorlaborationens uppgifter testas i elektrotekniksalarna på KTH Valhallavägen efter att de utvecklats till att anses vara passande för kommande studenter.

1.4 Avgränsningar

- Laborationsuppgifterna ska utformas utefter den teori som studenter förväntas kunna inför laborationen.
- Laborationsuppgifterna ska kunna utföras på kortare tid än fyra timmar. Förberedelseuppgifter som hör till laborationen ingår ej i dessa fyra timmar eftersom dessa besvaras innan själva laborationstillfället.
- Laborationen utformas enligt de mål som satts för kursen ”*Elkraftteknik I*”.
- Verktygen som ska användas vid utförande av laborationsuppgifter ska klara av de spänningar och belastningar som används.

2. Teori

Kapitlet innehåller teori för förståelse av transformatorns funktioner, typer och sätt som transformatorn kan utvecklas på för framtiden. Kapitlet kan användas som teoridel i undervisningsmodulen.

2.1 Transformatorn

Transformatorns huvudsakliga funktion är överföring av elenergi från ett spänningssystem till ett annat spänningssystem och används i elöverföringssystem för växelspanning. Den består av en laminerad järnkärna med lindningar placerade på den, för enfastransformatorn är det två lindningar och för trefas är det två lindningar per fas, totalt sex lindningar. Kärnan och lindningarna är grundpelarna för transformatorns funktion.

Lindningarna på primärsidan ansluts till växelspanningsnätet och lindningarna på sekundärsidan ansluts till en belastning som förbrukar elenergin. För att undvika ett för stort magnetiskt läckage fördelas primär- och sekundärlindningarna på transformatorns ben. Transformatorn kan antingen transformera upp eller transformera ned spänningen. Vid nedtransformering som är det vanligare av de transformeringssätten sänks höga spänningar på primärlindningen ned till lägre spänningar på sekundärlindningen. Vid upptransformering ökar lägre spänningar på primärlindningen upp till högre spänningar på sekundärsidan.

Ett sätt att transformera trefaseffekt är att använda tre likadana enfastransformatorer. Det sättet att transformera trefaseffekten är bra vid mycket höga effekter, men vid lägre effekter används normalt en transformator med en gemensam järnkärna för hela transformatorn, dvs. en trefastransformator.

Förluster som orsakas av friktion då en maskin rör sig och vibrerar är obefintliga i transformatorn, eftersom transformatorer är statiska och orörliga maskiner, Detta gör att verkningsgraden tenderar att vara mycket hög, mellan 90-99 %.

Det finns både en- och trefastransformatorer men de mest använda transformatorerna är trefasiga. Både en- och trefastransformatorer

har samma grundläggande principer samt samband och driftegenskaper [8].

2.2 Transformatorns uppbyggnad

Som tidigare nämnt är transformatorns huvuddelar kärnan och dess lindningar. Det tillkommer även andra delar och kringutrustningar för de olika transformator typerna, t ex en transformatorlåda fylld med olja som krafttransformatorer stoppas i eller temperatur- och gasvakter som mäter olje- och lindningstemperaturer respektive gasbildning i transformatorns isoleringsolja.

2.2.1 Trefastransformatorns uppbyggnad

Ett sätt att transformera trefaseffekt är att använda tre likadana enfastransformatorer. Det sättet att transformera trefaseffekten är bra vid mycket höga effekter, men vid lägre effekter används normalt en transformator med en gemensam järnkärna för hela transformatorn, dvs. en trefastransformator.

Summan av de tre fasspänningarnas ögonblicksvärden i ett symmetriskt system är lika med noll. Detsamma gäller för huvudspänningarna i systemet. Det betyder att summan av flödena som är sammanhängande med spänningarna också är lika med noll i varje ögonblick, vilket betyder att det inte behövs någon magnetisk återledare för summaflödet. Kärnan kan alltså utföras med endast tre ben, en fas för varje ben. En sådan trefastransformator som har en fas per ben kallas för trebenstransformator.

En benlindningsfatt placeras på varje ben. Benlindningsfasen består av två lindningsfaser. Lindningsfaserna kopplas ihop till en upp- och en nedspänningslindning. Det går att koppla ihop lindningarna på olika sätt.

Kärnan i transformatorn kan bestå av 0,35 mm tjocka plåtar av kallvalsad plåt, kallad orienterad plåt, som har bra magnetiska egenskaper i valsriktningen. Plåtarna är isolerade på båda sidor.

Vanligtvis görs kärnan med 45-graders stötfogar för att få så små tomgångsförluster som möjligt, eftersom dessa är lokaliserade till kärnans hörn [8].

2.2.2 Transformatorns kärna

Kärnor byggs upp på två olika sätt, småtransformatorers kärnor sätts samman av formstansade plåtsnitt medan större transformatorers kärnor alltid är sammansatta av raka bitar som sätts ihop med speciella bladningsmönster i hörnen.

2.2.3 Kärntyper

Det finns ett antal olika kärntyper, bland annat D-kärna, T-kärna och TY-kärna.

Dessa kärntyper har kärnben med rund sektion som är omgivna av koncentriskt ordnade cylinderformade lindningar. D-kärnan har två ben och används i små enfastransformatörer.

Summan av de tre fas- och huvudspänningarna i ett symmetriskt system lika med noll. Det betyder att summan av delfasflödena som är sammanhängande med spänningarna också är lika med noll i varje ögonblick, dvs. ingen magnetisk återledare behövs för summaflödet hos en trebenstransformator med T-kärna. T-kärnan har tre ben, en fas för varje ben.

Vissa transformatorer använder sig av en TY-kärna, en kärna med fem ben. TY-kärnan används till att minska ok-höjden och underlätta transporten av spänningen.

Mantelkärnor

En annan typ av kärnor som används är mantelkärnor, t ex EY-kärnan. Mantelkärnans används för både små och stora enfastransformatörer och dess ben har lindningspaket av avlånga skivor istället för cylindriska lindningar. Till skillnad från övriga kärntyper där lindningarna är placerade längs varandra på kärnan lindas både primär- och sekundärlindningarna runt kärnans mittenben [8].

Toroidkärnor

Toroidkärnor även kallad ringkärnor har de bästa magnetiseringsegenskaperna och används oftast i mindre enfastransformatorer vid låga effekter. Eftersom toroidkärnor är cirkelformade lindas lindningarna över hela kärnan som ett täcke över kärnan [8].

2.2.4 Järnkärnans materiel och uppbyggnad

Den laminerade järnkärnan består av tunna plåtar som vanligtvis har en tjocklek på mellan 0,25 – 0,5 mm och ett tunt isoleringsskikt med en tjocklek mellan 3-4 mikrometer. Kärnan byggs upp av så tunna plåtar som möjligt och små isoleringsskikt för att minska virvelströmmarna som skapas i kärnan. Vid en transformators konstruktion eftersträvs materiel som ger goda magnetiska egenskaper, därför används ofta ”*orienterad plåt*”. Det är plåt vars kristaller orienterats till att ha bra magnetiska egenskaper i plåtens längdriktning genom en speciell valsningsteknik och kritisk värmebehandling. För bättre magnetiska egenskaper än orienterad plåt finns det superiororienterad plåt som ger 10 % mindre effektförluster än orienterad plåt, som i sin tur ger ca 70 % mindre effektförluster än bästa icke-orienterade plåten. Vidare konstrueras kärnan vanligtvis med 45-graders stötfogar för att få så små tomgångsförluster som möjligt, eftersom dessa är lokaliserade till kärnans hörn.

När det är dags att sätta ihop de tunna plåtarna är det viktigt att tänka på att eliminera luftgap som kan finnas mellan skivorna för att undvika att plåtarna börjar vibrera under drift samt minska reluktansen, dvs. det magnetiska motståndet, i kärnan. Vibrationen orsakar onormalt kraftigt brummande vid drift. Det är möjligt att minska brummandet men inte att få transformatorn att bli helt tyst. Det normala brummandet beror på längdförändringarna i kärnplåten som orsakas av det magnetiska flödets variation [8].

2.2.5 Transformatorns lindningar

Beroende på transformatorstyp och dess storlek används olika lindningar. Val av rätt lindningar är en viktig del vid en transformators konstruering då fel sorts lindningar kan ge sämre miljötålighet och ökad värmeledning.

Det finns flera olika sorters lindningar som används i de olika transformator typerna. I småtransformatorer används lagerlindningar av lackerad rundtråd som doppimpregnerats med lack, i distributionstransformatorer används antingen högspännings- eller lågspänningslindningar. Högspänningslindningar är de vanligare och består av flerlagerlindningar, som kan vara av aluminium eller koppar, med en lackerad eller pappersomspunnen ledare. Ledaren kan vara rund eller rektangulär. Lågspänningslindningar utförs med bredare band av aluminium som lindas med foliemellanlägg. I stora krafttransformatorer används skiv-, skruv och lagerlindningar. Skiv- och skruvlindningar går från ett kärnbens ena ända till den benets andra ända. Lindningarna i större manteltransformatorer byggs av stora avlånga skivor som staplas till paket med isolations-skärmar som hör till respektive skiva. Transformatorernas lindningar måste ankras fast både axiellt och radiellt med klackar respektive stödrribbor. I torrisolerade transformatorer är ribborna gjorda av plast och i oljeisolerade transformatorer är de ”presspan”, ett cellulosebaserat material. Presspan klarar av högsta krav på elektriska och mekaniska egenskaper [14]. Anledningen till varför lindningarna måste ankras fast med starka stöd är att det uppkommer stora mekaniska krafter vid kortslutning av transformatorns sekundärlindning [8].

2.2.6 Kylning av transformatorn

Eftersom det skapas en del värmeutveckling i transformatorer vid drift är det nödvändigt att kyla ned dessa på olika sätt för att minska effektförluster och skador. Temperaturökning i oljetransformatorer kan leda till gasbildning i oljan, därför ansluts en gasvakt till vissa oljetransformatorer.

Varje transformators byggnadsmateriel klarar av en viss värmeutveckling och temperatur innan den börjar ta skada. För att undvika skadorna och effektförlusterna kyls transformatorerna ned, t ex genom fläktar och radiatorer eller med kylfläns.

Transformatorer som använder sig av kylfläns eller liknande kallas för självskylda transformatorer, transformatorer som använder fläktar och radiatorer kallas för forcerat kylda transformatorer.

Både torrisolerade och oljeisolerade transformatorer kan vara självskylda. Kylningen sker genom spontan strömning av kylmediet, för torrisolerade transformatorn gäller det för luft genom transformatorn och för en oljeisolerad transformator är det olja genom lindningarna. Den yttre kylningen av en självkyld oljeisolerad transformator sker spontant och utan några hjälpmedel utifrån. Det gör den mer ekonomiskt tilltalande eftersom inga extra kostnader eller underhåll för extra kylningsmetoder krävs för att kyla ned transformatorn. Mindre oljetransformatorer som distributionstransformatorer har en låda av tunnplåt och kyls ned med veckade kylflänsar medan större transformatorers lådor vanligtvis byggs av grovplåt och förses med utåtvända radiatorer, det gör att stora oljetransformatorer är kräver mycket mer plats och större utrymme än en mindre transformator på grund av de externa radiatorerna som krävs för att kyla ned den. Istället för att använda sig av självkylning av större oljetransformatorer är det då bättre med forcerad kylning för att undvika onödigt användande av utrymmen som skulle kunna användas för annat. Forcerad kylning av en sådan transformator innebär att den får en kylare eller radiatorer som kyls ned med fläktar, samtidigt som oljan cirkuleras genom kyldonen med hjälp av pumpar. Transformatorer under 25 MVA kyls med självkylning och transformatorer med effektvärden över 25 MVA kyls forcerat [8].

2.2.7 Transformatorolja

Oljan som används i oljeisolerade transformatorer är en specialraffinerad olja med en hög elektrisk isolerhållfasthet, åldras långsamt och har låg viskositet (tjockhet). Den används som avledare för värmeutveckling i transformatorn och som elektrisk isolator. Ju bättre kvalitet det är på oljan som används desto bättre egenskaper och isolering och mindre problem som åldring och känslighet för föroreningar av partiklar och vatten.

Det är möjligt att kontrollera oljans kondition med en analys som ger information om isolationsspänningen, dvs. oljans isoleringsförmåga. Kontrollen bör göras med jämna mellanrum för att undvika tidigare nämnda problem. Skulle det visa sig att oljans egenskaper blivit sämre är det möjligt att regenerera den med en reningsmetod.

Reningsmetoden går ut på att låta oljan passera genom ett blekjordsfilter som tar bort föroreningar som t ex silikonsmitta genom att absorbera dem. Processen tar ca 2 veckor att utföra; under den tiden kan transformatorn vara i drift utan några problem [6]. Själva blekjorden är det ljusa urlakningsskiktet i en podsoljord som förlorat det mesta av det organiska innehållet genom urlakning [16]. Kvar är mineralet kisel. Urlakning är en process där näringsämnen och lättlösliga ämnen som metalljoner frigörs från jorden och tvättas bort med avrinnande vatten [15].

Några fördelar med regenerering av oljan är som nämnt att transformatorn inte behöver stoppas utan kan fortsätta vara i drift under reningsprocessen, bra för miljön eftersom ingen ny olja behöver sättas in i transformatorn utan oljan återanvänds, det är ekonomiskt sett billigare för företag att regenerera oljan istället för att byta ut den. Inget oljebyte leder till att företag inte behöver förstöra gammal olja och därmed förlora pengar [17]. Det är dock inte all sorts olja som kan eller bör regenereras eftersom vissa sorter är farliga för miljön redan från början, t ex PCB-olja som finns i äldre transformatorer som tillverkats innan 1978.

Transformatorn måste i övrigt övervakas noggrant eftersom det förekommer elektriska och mekaniska påfrestningar under drift vilket kan orsaka driftstörningar vilket i sin tur leder till onödiga kostnader för underhåll och förlorad elenergi. Vanligen är det oljans och lindningarna temperaturer som övervakas, detta eftersom ökad olje- och lindningstemperatur leder till att transformatorn kan överhettas och i sin tur expandera och skadas. För att undvika volymförändringen vid temperaturökning utrustas de flesta transformatorerna med ett expansionskärl som klarar av volymökningen. Transformatorer som är lufttäta och har fjädrande lådor istället för expansionskärl används dock alltmer i industrin. Det är viktigt att oljan i oljeisolerade transformatorer inte får någon fukt i sig då det gör att oljan tappar sina isolerande egenskaper, därför används en torkapparat fylld med silicagel som suger upp fukten ur oljan. Torkapparaten med gel måste i sin tur kontrolleras och bytas ut eller torkas med jämna mellanrum eftersom sugförmågan försämras ju mer fukt som suges upp. Silicagel har en egenskap som gör att den skiftar färg från ljusblå till ljusröd

allteftersom fukt upptas av den vilket gör det lättare att underhålla apparaten och byta ut gelen.

2.2.8 Kontroll via temperaturvakter

Som nämnt ovan måste transformatorns olje- och lindningstemperatur övervakas. Anledningen till att temperaturen i både oljan och lindningen mäts och övervakas är att plötsliga effektökningar inte ökar oljans temperatur tillräckligt snabbt för att temperaturökningen ska märkas. Det kan ta flera timmar för oljan att upphettas tillräckligt, på grund av den stora mängden i transformatorn. Lindningarna å andra sidan värms upp redan efter ca 10 minuter och temperaturökningen kan registreras i tid. Oljan kan övervakas med exempelvis en signaltermometer som kan mäta toppoljans temperatur och visa den i realtid eller en maximaltermometer som även visar den högsta temperatur som oljan nått under effektökningen. Termometern kan mäta oljan genom två elektroder som sätts in i toppoljan. Med hjälp av den uppmätta temperaturen kan sedan elektroderna signalera starta fläktar, pumpar eller andra nedkylningsapparater. Gällande lindningstemperaturen är det bättre att använda en kompenserad termometer eftersom det är svårare att mäta lindningens temperatur än vad det är att mäta toppoljans temperatur. En strömtransformator som känner lindningsströmmen används till att kalibrera anordningen så den visar temperaturen. Det är i samband med värmeprov på transformatorn som kalibreringen görs, termometern får då visa temperaturen i lindningens varmaste punkt.

2.2.9 Kontroll av gasbildning med gasvakt

Vid temperaturökning av oljan kan även gasbildning ske i oljan. Mellan transformatorns högsta punkt och expansionskärlet kan en så kallad gasvakt installeras, som upptäcker gasbildning och hög strömningshastighet i oljan. Gasvakten består av en flottör, två kvicksilverkontakter och en skärm. Flottören ansluts till ena kontakten medan skärmen ansluts till den andra kontakten. Flottören kommer att hamna längst upp i ledningen som väntat, skärmen hamnar längst ned i oljeledningen. Vid gasbildning kommer oljan att övergå till gasform, varför det heter gasbildning vid temperaturökning. Ju mer gas desto mindre olja. Det betyder att flottören som flyter på oljan gradvis kommer att sjunka ned efter en

viss tid av gasbildning. Vid en viss nivå kommer detta att medföra att den första kontakten sluts och därmed signalera gasbildningen i transformatorn. Vid kortslutning och ljusbågar får oljan högre strömningshastighet, det gör att skärmen som ligger längre ned i ledningen trycks ned. Det leder till att den andra kontakten sluts till och kopplar bort transformatorn.

2.3 Transformator typer

Det finns ett flertal transformatorer ute i industrin idag, varje med egen funktion och eget användningsområde. Vissa transformatorer används vid slutänden av transmissionslinjer i ställverk, som Y/D-kopplade högspänningskrafttransformatorer som används till att transformera ned höga spänningar till distributionsvänliga spänningar på 22 kV eller lägre. Andra transformatorer används vid början av transmissionslinjer där de istället transformerar upp spänningen för att undvika höga spänningsfall där spänningen ska färdas längre sträckor. Ett exempel på en sådan transformator är en D/Y-kopplad krafttransformator.

De olika transformator typerna kategoriseras enligt följande:

Krafttransformatorer har vanligen en märkeffekt på över 5 kVA vid trefas och över 1 kVA vid enfas [2]. Vidare kategoriseras krafttransformatorer enligt två typer, distributionstransformatorer som har en märkeffekt mellan 10 och 2000 kVA och större transformatorer. Dessa transformatorer används vid elöverföringssystem för elenergi.

Småtransformatorer har lägre märkeffekt än krafttransformatorer. Mättransformatorer som för mätning eller reläskydd.

2.3.1 Krafttransformatorer

Krafttransformatorn är en transformator vars funktion är att överföra effekt på minst 5 kVA trefas eller 1 kVA enfas. Dessa värden gäller större krafttransformatorer, transformatorer av mindre storlek har andra regler för effektvärden som de kan överföra, t ex

mättransformatorer som är så kallade icke-krafttransformatorer vars uppgift är att överföra information istället för effekt. Andra speciella transformatorer som är undantagna från regeln om minsta effektvärden är t ex transformatorer som används för skyddsändamål [2].

2.3.2 Distributionstransformatorer

En distributionstransformator används för allmän kraftförsörjning vid t ex elverk eller i industrier, dess funktion är transformering av spänning ner från högst 20 kV-nät till lägre spänningar, t ex 400 V. Transformatorer med högspänd nedspänningssida kallas vanligen inte för distributionstransformator även om de nät där de ingår skulle kallas för distributionssystem.

Internationella normer sätter en övre gräns vid 3150 kVA för distributionstransformatorn men Svensk standard har en gräns mellan 1600 kVA och 2500 kVA [2].

2.3.3 Autotransformatorer

Ännu en typ av transformatorer, denna kallas för autotransformator eller sparkopplad transformator. Detta är en transformator som skiljer sig från vanliga transformatorer eftersom en av dess primärlindningar har en gemensam del med en sekundärlindning. En vanlig transformator där primär- och sekundärlindningarna är skilda kallas för "fulltransformator".

Autotransformatorn, speciellt om omsättningen är nära 1:1, tenderar att ha en lägre vikt än en fulltransformator. Den här transformatorotypen har dock några nackdelar, dels är inte primär- och sekundärlindningarna galvaniskt skilda, dvs. lindningarna är inte höghögmigt skilda från varandra. I transformatorers fall fås en galvanisk åtskillnad mellan lindningarna genom tomrummet mellan primär- och sekundärlindningarna.

Avsaknad av galvanisk åtskillnad minskar antalet trefaskkombinationer som kan användas för transformatorn och isoleringsproblemen blir mer komplicerade eftersom lindningarna inte är isolerade från varandra. På grund av dessa problem kan t ex en distributionstransformator av säkerhetsskäl inte användas som autotransformator.

Vanligast används därför autotransformatorer i Skandinavien endast som stora Y-kopplade 0,4/130 kV systemtransformatorer mellan nät som är direktjordade [2].

2.3.4 Reglertransformator

Reglertransformatorn är en transformator vars omsättning är kraftigt varierbar och används främst för speciella ändamål, t ex matning av ugnar eller provutrustningar. Notera att det är den svenska definitionen av en reglertransformator. Utanför Sverige används termen "Regulating transformer" för transformatorer där spänningsreglering är möjlig under drift. I Skandinavien anses den egenskapen som en normal del av vanliga mottagningstransformatorer [2].

2.3.5 Oljeisolerade och torrisolerade transformatorer

Transformatorer som har en märkeffekt över 5MVA samt de flesta distributionstransformatorer är vanligen fyllda med mineralolja och försedda med expansionskärl. Det finns även distributionstransformatorer med hermetiskt slutna fjädrande lådor ute i industrin.

Innan de förbjöds användes PCB transformatorer som isolerades med obrännbar vätska, kallad för Askarel eller PCB, vid inomhusinstallationer. Dessa transformatorer bannlystes av miljöskäl eftersom de isolerades med PCB, "polyklorerade bifenyler", ett mycket miljöfarligt ämne som användes fram till slutet av 1970-talet.

De torrisolerade transformatorerna används för högst 20 kV system. Det finns två sorters torrisolerade transformatorer, transformatorer med enkelisolerade lindningar och transformatorer med plastinbakade eller ingjutna lindningar. Största skillnaden mellan dem är miljötåligheten [2].

2.3.6 Mättransformatorer

Mättransformatorer skiljer sig från krafttransformatorerna. Mättransformatorns uppgift är att transformera ström och spänning från ett högt värde ned till standardvärden för reläer och instrument, vilka är 1, 2 och 5 A samt 110 och 230V.

Mättransformatorn är en speciell transformator för mätning av ström och spänning. Den bygger på samma teori som för vanliga transformatorer.

För en kortslutet transformator är sambandet mellan ström och varvtal:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (1)$$

Och under tomgång:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2)$$

Där I_1 är primärströmmen, I_2 är sekundärströmmen, N_1 är lindningsvarv för primära lindningen, N_2 lindningsvarv för sekundära lindningen, E_1 tomgångsspänningen på primärsidan och E_2 tomgångsspänningen för sekundärsidan. Formel (1) gäller för strömtransformatorn och (2) för spänningstransformatorn.

Mättransformatorn bestäms med hjälp av fyra olika parametrar. Dessa är isolationsnivå (märkspänningen), primär märkström, kortslutningsström och sist börda och noggrannhet [3].

Isolationsnivå

För att kunna motstå driftspänning samt överspänningar och isolationsnivåer som förekommer i huvudnätet måste en strömtransformator inneha en god isolationsnivå [3].

Märkström

En viktig egenskap som strömtransformatorn måste inneha är att den ska klara av märkströmmen vid kontinuerlig drift. De ska även vara dimensionerade enligt IEC 185 eller ANSI C57.13, som båda anger en omgivningstemperatur på 30°C.

Skulle driftströmmen vara större än märkströmmen måste en ”rating factor” specificeras. Rating factor är en faktor som strömtransformatorns märkström kan multipliceras med för att få ett värde som transformatorn klarar. Anges faktorn till 1,5 ska strömtransformatorn klara av $1,5 * I_m$ vid kontinuerlig drift samtidigt som noggrannheten ska uppfyllas. Det finns speciella värden som den här faktorn kan inneha, specificerade i IEC-normen och dessa är 120 %, 150 % och 200 % av max primära märkströmmen [3].

Kortslutningsström

Kortslutningsströmmen är den maximala ström som strömtransformatorn klarar av under en sekund utan att transformatorns temperatur stiger till ett skadligt värde. För pappers-olje-isolation gäller 250°C som max gräns innan temperaturen skadar transformatorn. [3] Skulle kortslutningsströmmen inte vara angiven är det möjligt att beräkna den med hjälp av nätets kortslutningseffekt, S_k , vid huvudspänningen U_n .

$$I_k = \frac{S_k}{U_n * \sqrt{3}} A \quad (3)$$

När transformatorn kortsluts fås en mekanisk påkänning via strömkrafterna som är störst för första strömtoppen. Vid full osymmetri är strömmen:

$$I_{topp} = I_k * 2,5 A \quad (4)$$

Börda och noggrannhet

Bördan och noggrannheten används vid mätning av strömmen för strömtransformatorn. Det finns ett par sätt att mäta strömmen, vid normal drift och vid fel.

Bördan uttrycks i VA och är den yttre impedansen i sekundärkretsen vid specificerad effektfaktor.

- När strömmen mäts vid normal drift sker mätningen med en hög noggrannhet, låg börda och låg mätningsgräns. Mätningen sker mellan 5 % och 120 % av märkströmmen med noggrannhetsklasserna 0,2, 0,2S, 0,5 eller 1,0 enligt IEC-normen och 0,3 och 0,6 enligt ANSI-normen beroende på användningsområdet.
- När det gäller mätning vid fel mäts strömmen med höga felströmmar som registreras av reläer. Noggrannhetsklasserna 5P och 10P för IEC samt C- och T-klasser för ANSI anges vid den här mätningen.

Strömtransformatorn kan innehålla flera kärnor fördelade på mätkärnor och reläkärnor.

Mätkärnor

För att noggrannhetsklasserna ska uppfyllas måste mätkärnorna i transformatorn ha en låg magnetiseringsström, vilket även betyder en låg flödestäthet. En nickellegering behöver användas för att kunna få en bra noggrannhet vid låg magnetisering och för att skydda instrument och mätare från höga strömmar som uppkommer under felförlopp måste kärnan gå i mätning vid 5-10 gånger märkströmmen.

Överströmmen som en multipel av märkströmmen indikeras av instrumentfaktorn F_s . Det är den faktorn som visar när mätkärnan ska övergå till mätning och på så sätt begränsa sekundärströmmen till ett maxvärde, $F_s * I_m$, som gäller vid märklast. Mättningsvärdet ökar approximativt vid lägre bördor än märkbördan enligt nedan formel.

$$n = F_s * \left(\frac{S_n + R_{cT} * I_{sn}^2}{S + R_{cT} * I_{sn}^2} \right) \quad (5)$$

Där S_n = märkbördan, S = aktuella bördan, I_{sn} = primärström på sekundärsidan och R_{cT} = inre resistans vid 75°C.

Det är värt att nämna att noggrannhetsklassen inte garanteras för bördor över märkbördan. IEC-normen säger att noggrannhetsklassen ska uppfyllas mellan 25 % och 100 % av märkbördan. Dock kan den totala bördan bli mindre än 25 % av märkbördan med moderna mätare och instrument som har låg effektförbrukning.

Felet ökar vid lägre bördor beroende på varvkorrektionen som korrigerar för magnetiseringsströmmen. Minsta möjliga fel fås vid 75 % av märkbördan. Bästa sättet att optimera kärnan för noggrannhet är att välja en märkbörda som är 1,5 gånger större än den verkliga bördan enligt formeln ovan [3].

2.3.6.1 Konstruktion av strömtransformatorer

Det finns två typer av oljeisolerade strömtransformatorer, hårnål och toppkärnetyp. Det finns nack- och fördelar med båda typerna och de är konstruerade på olika sätt. Hårnålstypen har kärnor placerade i en låda på marknivå och dess primärledare är U-formad. I toppkärnetypen är mätkärnorna placerade på toppen av strömtransformatorn och primärledaren är vanligtvis rak.

Fördelen med hårnålstypen är dess låga tyngdpunkt vilket även betyder att tyngre kärnor kan användas utan att isolatorn påverkas. Det är enkelt att anpassa kärnans volym beroende på krav, lådan är en del av transformatorstativet och oljecirkulationen i primärledarna ger en jämnare temperaturfördelning och hindrar "hot-spots", dvs. områden där temperaturen är högre än andra.

På grund av U-formen av primärledare innebär det att ledaren måste vara lång vilket medför temperaturorsakade förluster. Vid strömmar över 2500A är den här typen av strömtransformatorer mindre konkurrenskraftig pga. förlusterna. Vid kortsluten finns det även begränsningar som max 80 kA under 1 sekund och 200 kA toppström.

Toppkärnetypens raka primärledare betyder lägre termiska förluster än hårnålstypen. Den har även högre märk- och kortslutningsströmmar

samt är konkurrenskraftig även vid spänningar på över 170 kV. Till skillnad från hårnålstypen har den sin tyngdpunkt högt uppe och tyngre kärnor sätter stress på porlinisolatorn. Eftersom den är känsligare för tyngre kärnor och har sin tyngdpunkt högt passar den inte för användning i områden med jordbävningar [3].

2.4 Olika kopplingsätt

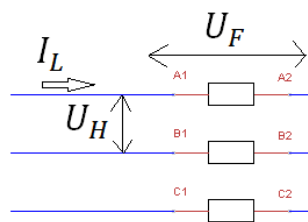
Belastningar är enheter som förbrukar effekt. Det finns resistiva, induktiva och kapacitiva belastningar. Exempel på belastningar är ugnar och glödlampor som är resistiva, motorer och lysrörsarmaturer som är induktiva och kondensatorbatterier som är kapacitiva.

Det finns två grundkopplingar för belastningens impedanser eller för lindningarna i en maskin, t ex trefastransformatorn. De kan även tillämpas då spänningskällans tre delspänningar hopkopplas.

Dessa grundkopplingar kallas Y-koppling och D-koppling. De har även andra benämningar, t ex stjärn- eller triangelkoppling för Y och deltakoppling för D [9].

Symmetrisk belastning antas för nedan formler och uttryck.

2.4.1 Y-koppling

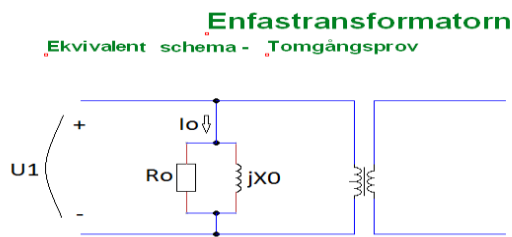


Figur 1. Figuren visar hur en transformators lindningar kan Y-kopplas.

Vid Y-kopplings utvecklas det en tredjedel av den totala effekten P_Y i varje impedans. Den totala effekten kan beräknas med hjälp av nedan uttryck:

$$P_Y = 3 * U_F * I_{LY} * \cos \varphi W$$

$$\text{eller } P_Y = \sqrt{3} * U_H * I_L * \cos \varphi W \quad (6)$$



Figur 2. Figuren visar hur det ekvivalenta schemat under tomgång.

Nollströmmen \bar{I}_0 är lika med noll i ett symmetriskt trefassystem. I Y-koppling kan man mäta två olika spänningar, fasspänningen U_F och huvudspänningen U_H . Linjeströmmen \bar{I}_L kan också mätas. Genom att ha uppgifter om fasspänning eller huvudspänningen samt impedansen för någon av faserna går det att beräkna linjeströmmens effektivvärde och vice versa, genom spänning och strömvärden är det möjligt att beräkna impedansen i lindningarna [10].

$$I_L = \frac{U_F}{Z} = \frac{U_H}{\sqrt{3}Z} A \quad (7)$$

De tre effektivvärdena för linjeströmmarna i faserna är lika stora.

Med hjälp av Kirchhoffs spänningslag beräknas huvudspänningen genom att mäta två olika fasspänningar, t ex U_1 och U_2 och ta ut skillnaden mellan dem. Det går även att räkna fram huvudspänningen genom spänningsskillnaden mellan fas 2 och 3 samt 3 och 1.

$$U_{12} = U_1 - U_2,$$

$$U_{23} = U_2 - U_3 \text{ eller}$$

$$U_{31} = U_3 - U_1 \quad (8)$$

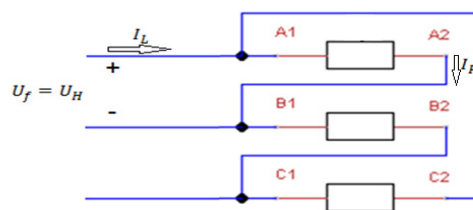
Är U_H angivet är det enkelt att räkna fram fasspänningen, genom formeln

$$\frac{U_H}{\sqrt{3}} = U_f \quad (9)$$

De tre fasledarna brukar i lågspänningsanläggningar där $U_H < 250V$ kallas för L_1, L_2 och L_3 . I högspänningsanläggningar, dvs. anläggningar där $U_H > 250V$ har fasledarna namnen R, S och T.

Vid Y-koppling är vektorsumman av strömmarna i A-, B- och C-lindningarna lika med noll eftersom varje fas är 120 grader förskjuten från den andra [9].

2.4.2 D-koppling



Figur. 2 Figuren visar en transformators tre faser uppkopplade enligt D-koppling.

Precis som vid Y-koppling så utvecklas en tredjedel av effekten i varje impedans. D.v.s. samma formler som vid Y-koppling kan användas till att beräkna den totala effekten [9].

Det är även möjligt att beräkna den totala reaktiva effekten och den totala skenbara effekten med lite modifikation av uttrycken för den totala effekten.

$$P = \sqrt{3} * U_H * I_L * \cos \varphi \quad \text{W} \quad (10)$$

$$Q = \sqrt{3} * U_H * I_L * \sin \varphi \quad \text{VA} \quad (11)$$

$$S = \sqrt{3} * U_H * I_L \quad \text{VA} \quad (12)$$

Strömmarna I_{AB} , I_{BC} och I_{CA} som kan ses i figur 1 och 2 är lika stora, men inbördes fasförskjutna 120° . Effektivvärdet kan beräknas genom de komplexa uttrycken:

$$\bar{I}_{L1} = \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA}, \bar{I}_{L2} = \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB} \text{ samt } \bar{I}_{L3} = \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC}. \quad (13)$$

Sambandet för spänningar vid Y-koppling gäller här för strömmen. Uttrycken nedan visar sambanden för fasströmmen och för linjeströmmen.

$$I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_F = I_\Delta = \text{fasströmmen}$$

$$I_L = I_A = I_B = I_C = \text{linjeströmmen}$$

$$I_L = I_F * \sqrt{3} = I_\Delta * \sqrt{3} \quad (14)$$

Vid D-koppling är fasspänningen lika med lindningsspänningen [9].

2.5 Utveckling av transformatorn

Trots att transformatorn är en mycket gammal uppfinning som utvecklats en hel del sedan den uppfanns finns det fortfarande anledningar till att vidareutveckla den, främst eftersom den är en viktig del av elkraftssystem. Främst är det viktigt att utveckla den till att bli mer driftsäker, bli mer kostnadseffektiv och vänligare för miljön.

Olika företag, t ex ABB och Siemens, som tillverkar transformatorer och andra elkraftsprodukter bedriver forskning för utveckling av transformatorer för minskad miljöpåverkan, bland annat genom att byta isoleringsolja i transformatorer från mineral till vegetabilisk olja.

I dagens industri finns det oljeisolerade och torrisolerade transformatorer. Oljeisolerad innebär att en brandsäker och mindre miljöfarlig olja används till att isolera transformatorn i händelse av olyckor som överspänning. En torrisolerad transformator har ett tomrum mellan lindningarna som skyddar från överspänningar.

2.5.1 Isoleringsoljor

Vanligen används mineral- eller silikonolja för isolering av oljeisolerade transformatorer. Eftersom mineralolja är en mycket brand- och miljöfarlig olja har flera företag som bygger transformatorer bedrivit forskning och tester med alternativa oljor för isolering. Ett alternativ som Siemens testat är vegetabiliska oljor. ABB har testat en olja som de kallar för BioTemp. Tidigare användes PCB som ett alternativ till andra isoleringsmedel som var brandfarliga och inte fullt lika effektiva.

PCB

Innan 70-talets slut tillverkades transformatorer där PCB användes som isoleringsmaterial. PCB började användas 1929 som isolator i transformatorer eftersom det är ett brandsäkert ämne, den ersatte andra brandfarliga oljor som användes som isolatorer. I takt med ökad förståelse om PCB:ns farliga egenskaper och dåliga påverkan, både på miljön och för människor och djur, minskade användningen av PCB i transformatorer och rent allmänt . År 1978 förbjöds ny tillverkning av material och maskiner som innehöll PCB, därmed slutade den sortens transformatorer att tillverkas. Det ska dock noteras att det finns sådana transformatorer ute i industrin än i dag, men de markeras med en varningskylt som tydligt visar att maskinen innehåller PCB.

Vegetabiliska oljor

Siemens har sedan 2012 byggt transformatorer i Colombia som använder vegetabilisk olja istället för mineral- och silikonolja, även kallade industriolja. Dessa transformatorer är säkrare, miljövänligare och kräver färre säkerhetssystem för att förhindra bränder och läckor.

Transformatorerna blir miljövänligare och säkrare på grund av den vegetabiliska oljans biologiska nedbrytbarhet och låga brandfarlighet. Den vegetabiliska oljan som används av Siemens är gjord på raps, soja eller solros, det betyder att det är enkelt att plantera nytt och skapa ny olja som kan användas. Oljan har en högre flampunkt och utgör ingen fara för vare sig miljön eller grundvatten vilket gör att transformatorer som använder den här oljan kan användas i platser där det vanligen inte är tillåtet eller är svårare att installera en transformator på grund av miljöskyddsreglering, t ex inomhus och i tätbefolkade områden.

Vegetabilisk olja har en brännpunkt på över 300 grader Celsius medan mineraloljans brännpunkt är mindre än 200 grader Celsius [11].

Eftersom det krävs färre säkerhetssystem är transformatorer som använder sig av vegetabilisk olja ekonomiskt sett billigare än motsvarande transformatorer med miljöfarlig och brandfarlig olja.

Till en början användes oljan endast för krafttransformatorer med spänningar på upp till 69 kV och 30 MVA effektvärde, men Siemens har lyckats vidareutveckla sina transformatorer sedan dess och har nu även oljan i transformatorer med spänningar på upp till 420 kV [18-19].

Biotemp

En annan ny "grönare" olja som kan användas som alternativ till mineral- och silikonolja kallas för Biotemp och används av ABB. Fördelarna med Biotemp är liksom de vegetabiliska oljorna som Siemens använder sig av en längre livstid, bättre miljövänlighet och en mycket kort biologisk nedbrytningstid. Biotemp är en dielektrisk isoleringsvätska som görs av förnybara och biologiskt nedbrytbara vegetabiliska oljor, oljor som i sin tur framställs av solrosor eller safflor. Oljan innehåller 75 % omättade fettsyror som är mycket stabilare då de utsätts för luft jämfört med andra oljor [7].

Likt de vegetabiliska oljor som används i Siemens transformatorer har Biotemp en högre flampunkt än mineralolja, 330 grader jämfört med 145 grader.

Miljömessiga fördelar

Biotemp är kompatibel med fasta isoleringsmaterial och går ned till 97 % nedbrytning redan efter 21 dagar, den går därför att använda både inomhus och utomhus i områden med högre miljöskyddsregler likt de vegetabiliska oljor som Siemens använder. Vidare har Biotemp testats och godkänts både enligt ASTM D2440 samt ASTM D3487 Typ 2, där den förra är en testmetod för oxideringsstabilitet för mineraloljor och den senare används till att bestämma om en olja innehåller PCB.

Även om det fortfarande behövs en sekundär spillbehållare för transformatorer som använder sig av Biotemp anses läckan inte vara en miljöfara eftersom biotemp likt andra vegetabiliska oljor har en så kort nedbrytningstid. Oljan kan därmed hanteras av kommunen och området där läckan skett kan torkas upp och saneras med tvål och vatten [13].

Dessa vegetabiliska oljor som används av ABB och Siemens, med olika namn är mycket lika och har liknande fördelar. De har en mycket bra absorptionsförmåga och klarar av att suga ut vätska som skapats i oljan samt genererats i äldre isoleringspapper. När vätska dras ut från isoleringspapper får isoleringen längre livslängd. Oljan fungerar även som ett skydd på isoleringen och gör det svårare för vätska att fastna eller komma in i isoleringspapperet. Genom att öka isoleringens livslängd ökar även transformatorns livslängd samt möjligheten att överbelasta transformatorn med upp till 10 % utan att livslängden blir kortare [7].

Ett problem med de grönare oljorna är att de oftast har lägre spänningshållfasthet och blir väldigt tröga vid lägre temperaturer. Det gör dem svårare att kyla ned.

Silikonolja kan också vara ett alternativ till mineraloljan på grund av sin högre flampunkt. Problemet är dock att företag oftast inte tillåter användning av silikonolja där det används mineralolja eftersom även en liten mängd silikonolja skulle göra att mineraloljan börjar skumma.

2.5.2 High Voltage Direct Current – HVDC-enheter

Vid strömöverföring med växelström (AC) fås reaktiva effekter som måste kompenseras via faskompensering och spänning som faller över ledningen, dvs. spänning ut är lägre än spänning som matas in.

Faskompensering kan göras med antingen genom att ansluta kapacitiva laster om det är induktiv reaktiv effekt som ska kompenseras eller induktiva laster om det är kapacitiv reaktiv effekt som ska kompenseras. Faskompensering är ett bra sätt att minska effektförluster på och därmed öka den aktiva effekten som kan användas men kräver att extra komponenter installeras.

Eftersom effektförlusterna i ledningen beror på hur lång ledningen är kommer det efter en viss längd att vara för dyrt att bygga den kompensering som behövs. Istället blir det mer ekonomiskt att konvertera AC till likström (DC). Även vid användning av undervattenskabel för strömöverföring över hav används DC, eftersom det dels är svårt att bygga kompenseringsverktyg längs ledningen om den ligger på havsbotten och dels för att bli av med kapacitiva förluster som fås i kabeln [12].

ABB använder stora HVDC-enheter för överföring av ström över långa sträckor, t ex världens längsta sträcka för överföring av spänning i Brasilien där ledningarna sträcker sig över 2500 km [4]. En enhet som transformerar upp växelspanning och konverterar den till likspänning installeras i början av ledningen vid kraftverket. Spänningen transformerar upp till högre spänningar för att minska resistiva förluster. En enhet installeras i området där spänningen kommer användas. Spänningen som likriktats i början av ledningen växelriktas och transformerar ned till hanterbara spänningar av den installerade enheten i andra änden av ledningen.

Fördelen med att använda DC istället för AC är att de två systemen har olika frekvens, för DC är frekvensen noll medan frekvensen för AC vanligtvis ligger på 50Hz, samt möjligheten att koppla isär delar av nätet vid fel utan att hela systemet havererar.

HVDC-anläggningar kan användas för spänningar upp till 1100 kV, dock medför högre spänningar att kostnaden ökar.

2.6 Vanliga felorsaker

Likt andra produkter som finns ute i världen är transformatorer inte helt felfria utan det händer att fel uppstår som kan förstöra transformatorn vilket leder till ekonomisk förlust och andra problem som strömavbrott i områden som matas av den. William H. Bartley PE som jobbar på *The Hartford Steam Boiler Inspection & Insurance Co* gjorde en studie under fem år som visar statistik över transformatorförluster under åren 1997 till 2001, främst på transformatorer med en märkeffekt på 25 MVA och högre. Målet med studien, som sänts till flera länder, var att ta fram data och statistik över förluster, fel, ålder vid fel etc. per år under åren 1997-2001 på grund av världens ökande konsumtion av energi samtidigt som världens transformatorer håller på att bli föråldrade.

Den delen som är av intresse för oss, transformatorfel visar statistik över transformatorfel. Totalt 94 fel hade noterats under dessa år, varav 24 var isoleringsfel, 22 design, material eller arbetsfel och 15 fel som orsakades av okänd anledning. Tabellen nedan visar felen som uppstått, dock inte externa fel som åsknedslag eller ledningsfel.

Tabell 1. Figuren visar en tabell över felorsaker för transformatorer med märkeffekter på över 25 MVA under åren 1997-2001 [5].

Cause of Failure	Number	Total Paid
Insulation Failure	24	\$ 149,967,277
Design /Material/Workmanship	22	\$ 64,696,051
Unknown	15	\$ 29,776,245
Oil Contamination	4	\$ 11,836,367
Overloading	5	\$ 8,568,768
Fire /Explosion	3	\$ 8,045,771
Line Surge	4	\$ 4,959,691
Improper Maint /Operation	5	\$ 3,518,783
Flood	2	\$ 2,240,198
Loose Connection	6	\$ 2,186,725
Lightning	3	\$ 657,935
Moisture	1	\$ 175,000
	94	\$ 286,628,811

Tabellen visar hur stora ekonomiska förluster transformatorfel kan ge på en så kort tid som fem år. Vanligaste felen är också några av de mest kostsamma.

Isoleringsfel

Tabellen visar tydligt att isoleringsfelen var den vanligaste orsaken till transformatorfel under perioden 97-2001. Isoleringsfel kostade ca 6,2 miljoner dollar per fall. Studien gjordes då en dollar motsvarade 8,542 svenska kronor. Som tidigare nämnt inkluderade inte studien fel orsakade av åsknedslag eller andra externa orsaker. Isoleringsfel uppkommer via fyra sätt; höga temperaturer, oxidering (rost), ökad surhet i isoleringsoljan och fukt. Fukt kan ses längst ner i tabellen. Medelåldern för transformatorer som gick sönder på grund av isoleringsfel var 18 år.

Design eller produktionsfel

Produktionsfel kan vara; lösa ledningar, lösa blockeringar, dålig lödning, dålig kärnisolering, dålig kortslutningsstålighet och objekt som lämnats kvar i transformatorlådan. Enligt tabellen är det denna kategori näst största orsaken till transformatorfel. Produktionsfel kostade 2,94 miljoner dollar per fall.

Oljekontaminering

Kategorin anser fall där det är tydligt att transformatorfelet beror oljekontaminering, exempelvis slambildning. Oljekontaminering kostade 2,95 miljoner dollar per fall.

Överbelastning

Överbelastning är då en transformator belastas mer än den tål under en längre tid.

Eld eller explosion

Kategorin står för fall där transformatorfel skett på grund av eld eller explosion utanför transformatorn. Den exkluderar fall där elden eller explosionen varit inuti transformatorn.

Överspänningar i linje

I den här kategorin inkluderas spänningsspikar, linjefel och andra oväntade plötsliga spänningsökningar. Problem med plötsliga spänningsökningar kan lösas med hjälp av överspänningsskydd eller bättre kortslutningstålighet.

Underhåll/Drift

Utförs underhåll av transformatorn på ett dåligt sätt eller inte tillräckligt ofta kan det leda till transformatorfel. Även drift på felaktiga sätt kan orsaka fel. I den här kategorin ingår fränkopplade eller dåligt satta kontroller, förlust av kylning, ackumulering av smuts och olja samt korrosion. När andra problem inte upptäcks i tid, dvs. innan transformatorfel sker, brukar problemet vara otillräckligt bra underhåll av transformatorn.

Översvämning

Översvämning avser de fall där felen uppstått på grund av översvämningar, både skapade av människan och naturligt orsakade, t.ex. genom kraftigt oväder. Även jordskred ingår i kategorin.

Lösa anslutningar

I den här kategorin ingår utförande och underhåll vid installering av elektriska anslutningar. Exempel på fel utförande är anslutning av olika metaller till varandra, det här problemet har dock minskat på senare år.

Åsknedslag

Överspänningar orsakade av blixtnedslag är relativt få och vid de fall där det är osäkert om överspänningar orsakats av åsknedslag räknas de under kategorin överspänningar.

Fukt

Endast ett av totalt 94 fall av transformatorfel under perioden 1997-2001 rapporterades som orsakat på grund av fukt. Det visar att fukt är ett

mycket litet problem och som inte nödvändigtvis behöver prioriteras lika mycket som exempelvis isoleringsfel. Det beror som tidigare nämnt på att en torkapparat fylld med silicagel som suger upp fukt ur oljan används till att undvika problem med fukt. I kategorin fukt inkluderas läckande rör och tak, läckage i transformatorlådan som gör att vatten kommer in i transformatorn och vätska i isoleringsoljan [3].

2.7 Instuderingsfrågor

Nedan följer instuderingsfrågor som kan användas i undervisningsmodulen. Frågorna baseras på information som kan hämtas från undervisningsmodulen.

1. Ge tre exempel som transformatorer kan utvecklas på i framtiden, förklara även hur det kan vara en bra utveckling för transformatorn miljömässigt.
2. Vilka fördelar har vegetabilisk olja över mineralolja när den används till att isolera transformatorer?
3. Beräkna kortslutningseffekten för en strömtransformator om strömmen vid full osymmetri är 300A. Anta att den inmatade spänningen är 400V.
4. Berätta kortfattat om regenereringsmetoden för transformatorolja.
5. Varför används orienterad plåt vid konstruktion av transformator kärnor?

3. Analys av laborationsresultat

Kapitlet går igenom laborationsresultat som togs fram vid utförande av laborationsuppgifterna för trefastransformatorn. Laborationsuppgifterna kan ses i Appendix 1.

3.1 Test och analys av laborationsuppgifter

En viktig del av examensarbetet är analys av laborationsuppgifterna som skrivits och utvärdering av resultaten som fås under utförandet av uppgifterna. Exempelvis är målet att se att det skapas en fasförskjutning på 30 grader mellan primär och sekundärspänningarna vid Yd och Dy-kopplingarna. Tyvärr har inte alla laborationsuppgifterna utförts eftersom det var brist på kondensatorer som ska agera som kapacitiv last, därför finns det endast resultat för uppgifter där det ej finns krav för användning av kapacitiv last.

Analysen av laborationsuppgifterna är en genomgång av laborationsuppgifter som utförts och analys av resultaten. Resultaten kunde fås med hjälp av spänningsmätare, strömtång, effektmätare och oscilloskop. Vid belastning av transformatorn ökades lasten sakta samtidigt som parametrarna mättes. De två uppgifter som inte kunnat utföras är uppgift ”4.2.3 Y-Y-koppling med kapacitiv last” och ”4.2.4 Y-Y-koppling med induktiv och kapacitiv last”. Meningen med uppgift 4.2.3 var att se hur en kapacitiv last påverkade transformatorn. 4.24 skulle visa hur faskompensering fungerade genom att parallellkoppla en induktiv och en kapacitiv last till transformatorns sekundärsida. Transformatorn belastas med den induktiva lasten först och sedan ökas kapacitansen sakta samtidigt som mätningar görs. Målet är att med ett oscilloskop se hur fasförskjutningen mellan spänningar sakta försvinner allt eftersom den reaktiva effekten går närmare noll.

Bilaga 2 visar hur transformatorn kopplades upp för de olika segmenten av analysen.

3.2 Tomgångs- och kortslutningsprov

Laborationen utfördes i uppgiftsordning och som kan ses i Appendix 1 började laboreringen med utförande av tomgångs- och kortslutningsprov av enfastransformatorn genom att endast använda en av transformatorns faser.

Poängen med proven är framtagning av transformatorns parametrar, som spänningsomsättning, tomgångseffekt, tomgångsström, kortslutningseffekt- och spänning samt magnetiseringsimpedansen.

3.2.1 Resultat vid tomgångsprov

Till en början skulle spänningsomsättningen bestämmas för att se om den stämmer överrens med varvtalsomsättningen. En mätning av primär- och sekundärspänningen gav spänningarna som användes till att beräkna omsättningen.

$$U_p = 228 V$$

$$U_s = 72 V$$

Varvtalsomsättningen N var 3,14 och beräknades med hjälp av antalet primär- och sekundärlindningsvarv som anges av transformatordata.

$$\text{Varvtalsomsättningen } \frac{N_p}{N_s} = \frac{330}{105} = 3,14$$

$$\text{Spänningsomsättningen } \frac{U_p}{U_s} = 3,16$$

Beräkningarna visar att omsättningarna stämmer överrens med varandra.

Sedan mättes tomgångs- strömmen, spänningen och effekten. Med hjälp av dessa värden beräknades magnetiseringsimpedansen. De olika värdena som beräknades kunde tas fram med hjälp av följande formler:

$$R_m = \frac{U_0}{I_{op}} = \frac{U_0^2}{P_0} \quad (15)$$

$$S_0 = U_0 * I_0 \quad (16)$$

$$Q_0 = \sqrt{S_0^2 - P_0^2} \quad (17)$$

$$X_m = \frac{U_0^2}{Q_0} \quad (18)$$

$$Z_m = \frac{R_m * X_m}{R_m + X_m} \quad (19)$$

Tomgångsströmmen: $I_{0p} = 0,34 \text{ A}$,

Tomgångseffekten: $P_0 = 37 \text{ W}$

Magnetiseringsresistansen: $R_m = 670 \Omega$

Magnetiseringsreaktansen: $X_m = 787 \Omega$

Reaktiva tomgångseffekten: $Q_0 = 66 \text{ VAr}$

Skenbara tomgångseffekten: $S_0 = 76,5 \text{ VA}$

Magnetiseringsimpedansen: $Z_m = 1034 \Omega$

3.2.2 Resultat vid kortslutningsprov

I nästa del av laborationen gjordes ett kortslutningsprov. För att kunna utföra provet utan att förstöra transformatorn anslöts en vidtransformator till kretsen. Med hjälp av denna kunde sedan kortslutningsströmmen sakta ökas till dess att märkström nåddes. Wattmetern användes till att mäta kortslutningsspänningen och effekten.

Tabell 2. Figuren visar en tabell över de uppmätta parametrarna kortslutnings -ström, -spänning och -effekt.

Uppmätt		
U_k	I_k	P_k
13,8	3A	40W

3.3 Y-Y-koppling vid tomgång

Målet med att Yy-koppla transformatorn och köra den obelastad är att låta studenten se hur primär- och sekundärspänningarnas faskurvor ser

ut. Ett oscilloskop används till att se hur kurvorna ser ut, om det finns någon förskjutning och hur stor den är:

Mellan en huvudspänning och en fasspänning.

Mellan en fas och en annan fas.

Mellan primär- och sekundärsidan.

Mätningarna som gjordes med oscilloskopet visade att det mellan huvud och fas finns en förskjutning på ca 35° , faserna är förskjutna med 120° från varandra och primär- och sekundärsidorna ligger i fas vid Yy-koppling.

Tabell 3. Tabellen visar de förskjutningar som mättes under analysen.

Fas-Fas	Huvud-Fas	Primär-sekundär
120°	35°	---

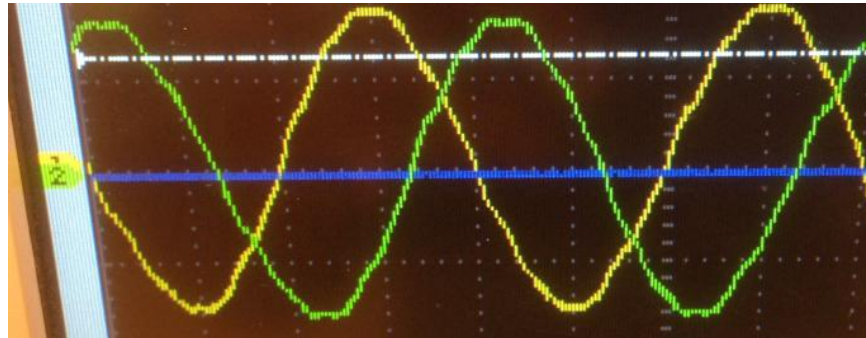


Bild 1. Bilden visar faskurvorna för två olika fasspänningar då transformatorn är Yy-kopplad.

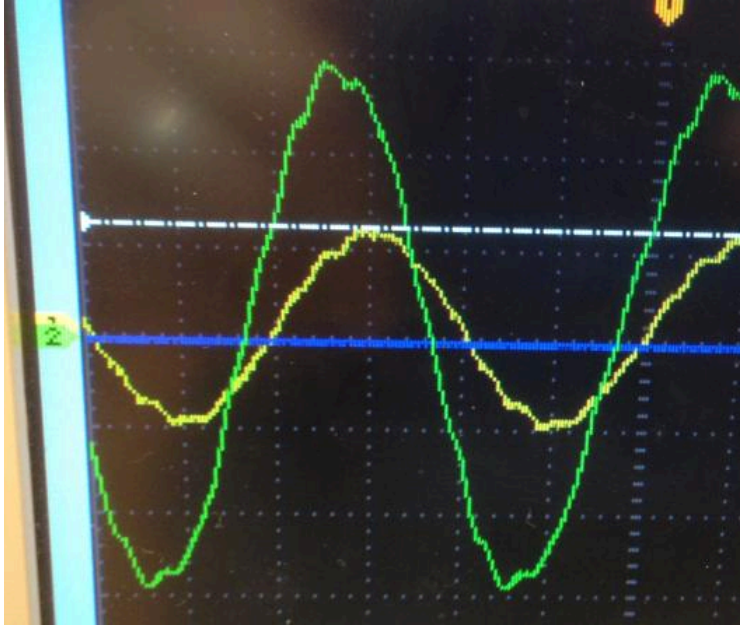


Bild 2. Bilden visar faskurvorna för en huvudspänning (grön) och en fasspänning (gul) då transformatorn är Yy-kopplad.

3.4 Y-Y-koppling med resistiv last

Med den här uppgiften var målet att se hur transformatorn påverkas av en rent resistiv belastning. Tyvärr är det inte lika lätt att få en last som är rent resistiv i verkligheten som i teori men analysen visar att det är möjligt att komma nära nog.

Flera parametrar ska mätas under det här segmentet, bland annat strömmen, huvud- och fasspänningen på sekundärsidan samt effekten. . Med dessa värden kan sedan fasförskjutningen beräknas.

Fasförskjutningen beräknas med formeln:

$$P = U * I * \cos \theta \quad (20)$$

Tabell 4. Tabellen visar de värden som mättes upp under analysen vid resistiv last. Huvud- och fasspänning, ström, skenbar effekt, aktiv effekt, reaktiv effekt och fasförskjutningen mellan spänning och ström.

U_h (V)	U_f (V)	I (A)	S (VA)	P (W)	Q (Var)	θ
227	145	0,43	96	88	41	$\approx 25^\circ$
227	143	1,0	228	225	43	$\approx 8^\circ$
227	140	2,0	465	453	43	$\approx 3,8^\circ$
227	139	3,0	685	690	43	0

Eftersom värdet som syntes på wattmeters skärm fluktuerade så mycket har det värde syntes mest valts att representeras i tabell 4, det betyder att fasen kan bli olika beroende på vilken effekt som används vid beräkning. Experimentet påbörjades med mycket hög resistans som sakta sänktes för att undvika risk för förstörd transformator eller brand.

3.4.1 Analys av resultaten

Det är möjligt att med tabellen se vad det är som sker då resistansen minskar. För att kompensera för lägre resistans måste strömmen öka för att hålla spänningen på 230V. Med ohms lag är det möjligt att se att det även stämmer teoretiskt.

Formeln för spänning enligt ohms lag $U = R * I$ visar att för att spänningen ska behålla samma värde måste en av parametrarna kompensera då den andra ändras.

Ex. om $U=200V$ och $R=100 \Omega$ måste strömmen vara $I=2A$. Ökar resistansen till 150Ω måste strömmen sänkas till $1,3A$ för att spänningen ska förbli densamma.

3.4.2 Analys av spänningsfallet vid resistiv last

En liten del av laborationen går ut på att beräkna spänningsfallet över transformatorn under de olika belastningarna. Följande formel användes till att beräkna spänningsfallet:

$$\Delta U = \sqrt{3} * I_2 * (R_{2k} * \cos \varphi_2 + X_{2k} * \sin \varphi_2) \quad (21)$$

Där $R_{2k} = 0,45\Omega$ och $X_{2k} = 0,43\Omega$. Efter beräkning av spänningsfallet skulle sekundärspänningen beräknas och jämföras med den uppmätta sekundärspänningen för att se om de stämmer överrens. De formler som användes till att beräkna sekundärspänningen kan läsas nedan:

$$U_{20} = \frac{U_1 * N_2}{N_1} = \frac{230 * 105}{330} = 73,18V \quad (22)$$

$$U_2 = U_{20} - \Delta U \quad (23)$$

U_{20} står för lindningsspänningen, U_1 för primärspänningen, dvs. den inmatade spänningen och N_1 samt N_2 för antalet lindningsvarv på primär- och sekundärsidorna.

Tabell 5. Tabellen visar de värden för spänningsfall och sekundärspänningen vid resistiv last.

ΔU	U_2
0,44V	72,74V
0,88V	72,3V
1,65V	71,5V
2,34V	70,84

Beräkningarna visar tydligt att ju lägre motstånd och därmed högre ström samt förskjutning mellan spänning och ström närmare noll desto högre spänningsfall, vilket i sin tur leder till lägre sekundärspänning.

Det teoretiska resultatet visar därmed att de uppmätta parametrarna stämmer.

3.5 Resultat vid induktiv belastning

Nästa del av laborationen var anslutning av en induktiv last till transformatorns sekundärsida och mäta samma parametrar som vid resistiv last med hjälp av en wattmeter. De uppmätta värdena visas i tabell 5 nedan.

Tabell 6. Tabellen visar de värden som mättes upp under analysen vid induktiv last.

U_h (V)	U_f (V)	I (A)	S (VA)	P (W)	Q (Var)	θ
230	144,7	1,0	234	42	231	$\approx 90^\circ$
230	145	1,1	255	46	248	$\approx 78,6^\circ$
230	144	1,2	275	52	269	$\approx 77^\circ$

För beräkning av förskjutningen mellan spänning och ström användes formeln för beräkning av reaktiv effekt istället för aktiv effekt eftersom det vid induktiv (och kapacitiva belastningar) skapas reaktiv effekt. Den aktiva effekten är liksom den reaktiva vid resistiv last orsakad av resistans som finns naturligt i kretsen.

$$Q = U * I * \sin \theta \quad (24)$$

Eftersom spolen som användes gav ifrån sig ett mycket högt oljud och överhettades kunde mätningar endast göras vid låga strömmar. Det går dock att se att förskjutningen mellan spänning och ström minskade samtidigt som den reaktiva effekten och strömmen ökade vid lägre induktans.

3.5.1 Analys av spänningsfallet vid induktiv last

Även vid induktiv belastning beräknades spänningsfallet över transformatorn.

Tabell 7. Tabellen visar de värden för spänningsfall och sekundärspänningen vid induktiv last.

ΔU	U_2
0,74V	72,44V
0,97V	72,21V
1,08V	72,1V

Beräkningarna visar hur spänningsfallet ökar då induktansen sänks, precis som då resistansen sänks vid resistiv last. Det beror på att förskjutningen mellan spänningen och strömmen minskar vid minskad

induktans. Till en början är $\cos \theta$ i formeln för spänningsfall lika med noll, dvs. då fasen ligger på 90° . Då förskjutningen minskar ökar värdet samtidigt som strömmen ökar vilket ger högre spänningsfallsvärde.

3.6 Y-D, D-D och D-Y-koppling vid tomgång

Vid dessa tre kopplingsätt kördes transformatorn endast under tomgång, dvs. ingen last anslöts till sekundärsidan. Eftersom målet med uppgifterna var att se hur spänningskurvorna ser ut och hur stor förskjutningen för de olika kopplingsätten räckte det med att köra under tomgång.

Med oscilloskopet kunde spänningskurvorna och fasförskjutningen mätas.

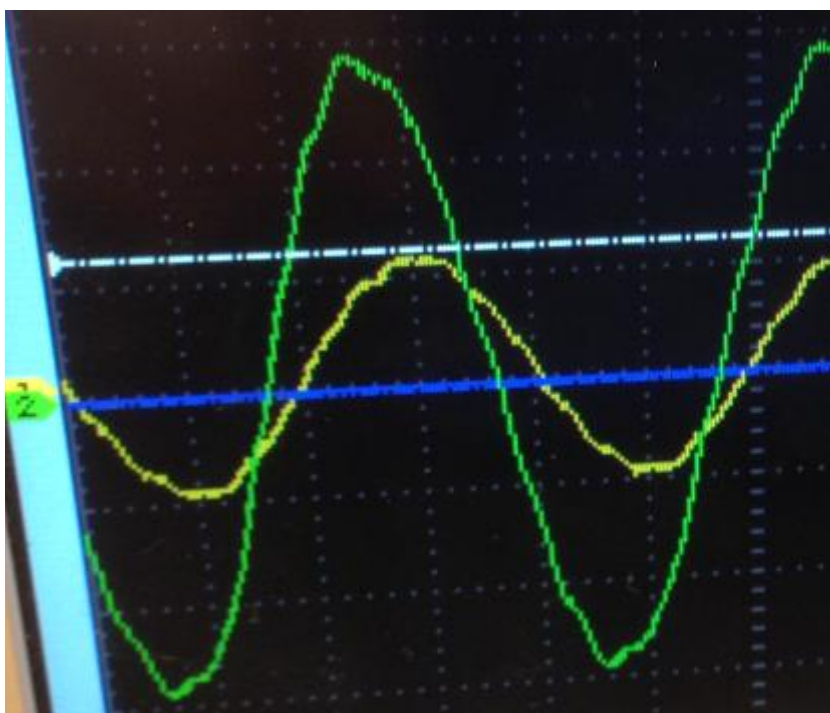


Bild 3. Bilden visar faskurvorna för primärspänningen (gul) och sekundärspänningen (grön) vid Y-D-koppling.

Vid Y-D-koppling fanns det en förskjutning på ca 30 grader mellan primär- och sekundärsidorna. Primärspänningen låg 30 grader efter sekundärspänningen

Vid D-D koppling fanns det ingen förskjutning mellan spänningarna, de var i fas. Se bild 4.

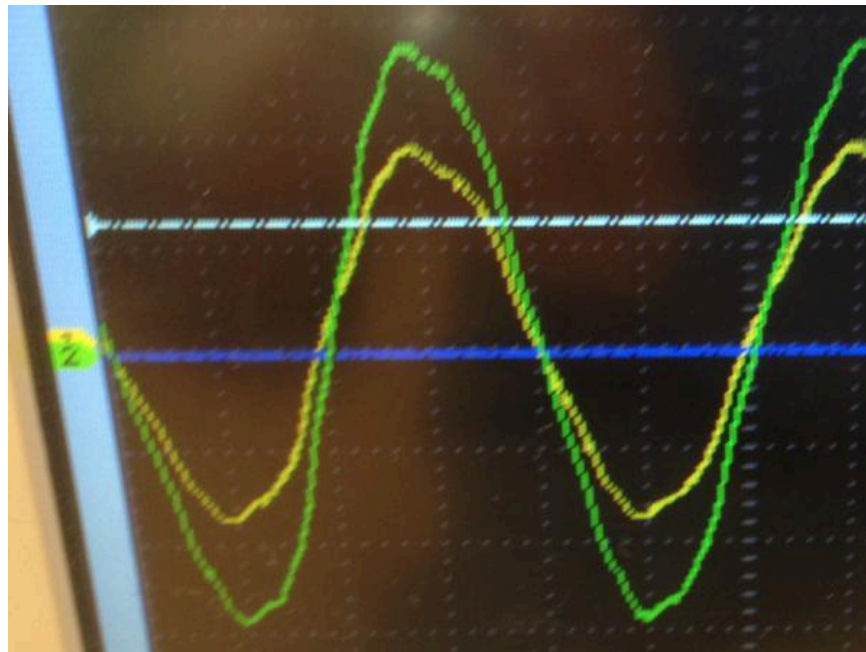


Bild 4. Bilden visar faskurvorna för primärspänningen (gul) och sekundärspänningen (grön) vid D-D-koppling.

Vid D-Y-koppling var primär- och sekundärspänningarna förskjutna från varandra med 30 grader, vid den här kopplingen låg dock primärspänninge före sekundärspänningen. Se bild 5.

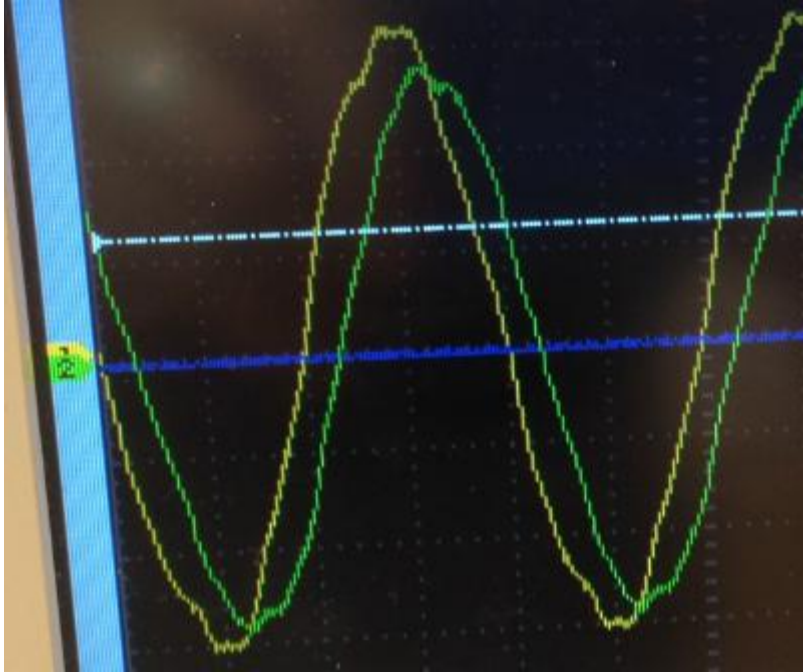


Bild 5. Bilden visar faskurvorna för primärspänningen (gul) och sekundärspänningen (grön) vid D-Y-koppling.

3.7 Ändring av förskjutningen manuellt

Sista delen av laborationen som utvecklats för kommande studenter i kursen *Elkraft I* är en överkursuppgift och är menad som en extra uppgift studenten kan göra då det finns tid över vid laborationstillfället. Målet med uppgiften är lära studenten att det är möjligt att ändra förskjutningen mellan primär- och sekundärspänningarna manuellt genom att endast ändra på hur sidorna faserna kopplas. För just den här laborationen är uppgiften att Y-Y-koppla transformatorn på ett sätt som gör att sekundärspänningen ligger en halv våglängd efter primärspänningen. Bild 6 visar faskurvorna vid kopplingssättet Yy6, dvs. att sekundärspänningen ligger 180 grader efter primärspänningen.

Kopplingen Yy6 kan ses uppritad i tabellen Bilaga 1.

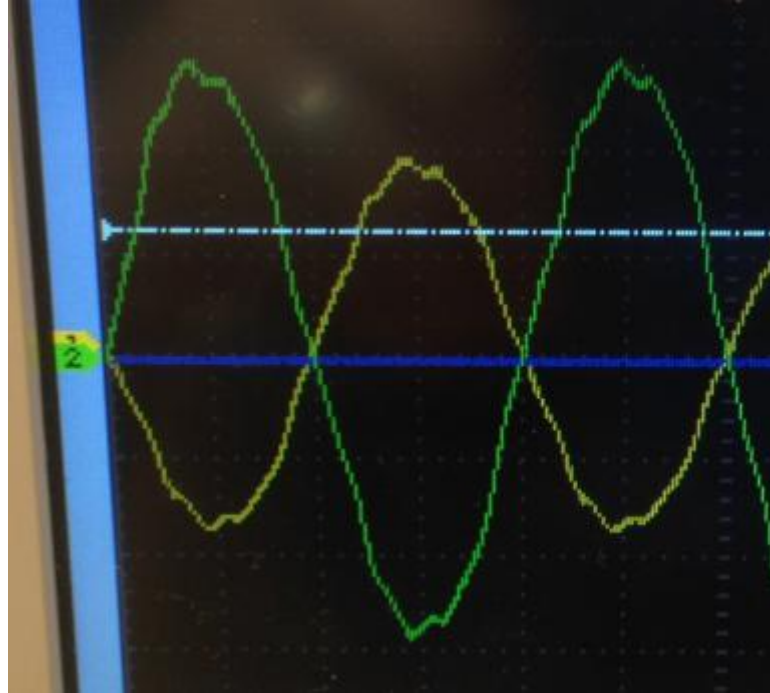


Bild 5. Bilden visar faskurvorna för primärspänningen (gul) och sekundärspänningen (grön) vid Yy6-koppling. Sekundärsidan ligger en halv våglängd efter primärsidan.

4. Genomförande

Det här kapitlet beskriver hur fakta samlats in för genomförande av examensarbete samt utveckling av laborationsuppgifter som passar kursen ”*Elkraftteknik I*”.

4.1 Arbetsmetodik

En stor del av examensarbetet har varit sökande efter information genom litteraturanalys, sökning på internet eller genom hjälp från experter inom området. Experterna bestod av bland annat Claes Carrander, doktorand på KTH och Naturvårdsverket. Litteratur som användes för formning av laborationsuppgifter har främst varit ”*Elkraftteknik*” av Thomas Franzén och Sivert Lundgren som används i kursen ”*Elkraftteknik I*” [9-10]. För teori kring transformatorer har litteratur inom elkraft använts, bland annat ”*Elkraftshandboken - Elmaskiner*” av Anders Cronqvist [8].

Tidigt i arbetets gång gjordes en förstudie där den äldre laborationen samt relevanta kapitel i kurslitteraturen analyserades för att få reda på vilka kunskaper studenter förväntas ha inför laborationen om transformatorn. Preliminära idéer om vilka uppgifter skrevs ned som ett tidigt laborationsPM. Under möte med handledare diskuterades dessa idéer samtidigt som tidsplanen för examensarbetet skulle uppdelas. Eftersom examensarbetet ska ta 10 veckor att utföra, dvs. 400h, planerades de olika delarna av arbetet enligt tio veckor.

4.2 Examensarbetets originalmål

Till en början handlade det här examensarbetet om att utforma två nya laborationer för två kurser, nämligen ”*Elkraftteknik I och II*”. Eftersom båda laborationerna i nuläget endast kan utföras i KTH Valhallavägens laborationssalar var planen att förflytta båda laborationerna till KTH Haninge. Laborationerna handlade om trefastransformatorn respektive synkrongeneratorn. På grund av att synkrongeneratorns laborationsuppgifter krävde inhandling av en permanentmagnetiserad synkrongenerator lades fokus istället på att endast utveckla transformatorlaborationen med tillhörande studie om transformatorer.

4.3 Transformatorstudie

Då analys av laborationsuppgifter uteblev gick en del arbetstid åt studien om transformatorer. Den mesta teori som skrivits om transformatorn kommer från litteratur samt olika företags informationssidor om transformatorer och produkter som används, exempelvis studien om utveckling av transformatorer. En del av informationen om vegetabiliska transformatoroljor hittades i studier om vegetabiliska oljors elektriska egenskaper och om användning av vegetabilisk olja för isolering av distributionstransformatorer. Lyckligtvis skyltar ofta företag om bedrifter inom miljöteknik och utveckling av produkter. Möjligheter till att finna information om miljöeffektiva metoder att utveckla transformatorer på har varit stor speciellt efter kontakt med företaget ABB som kunde leda mig vidare till en doktorand som kunde svara mer ingående på frågor angående utveckling av transformatorer.

Litteratur som använts för utvinning av information angående transformatorer, deras funktioner samt uppbyggnad är bland annat "Elkraftteknik" av Thomas Franzén och Sivert Lundgren [9-10], "Elkraftshandboken - Elmaskiner" av Anders Cronqvist [8] samt ABB:s elkraftshandbok [2-3].

Det är främst ABB:s handbok och information om produkter på ABB:s hemsida som lett till ökad kunskap om transformatorer, deras funktioner och användningsområden. Detta beror på att ABB är stora utvecklare av transformatorer och andra komponenter som används i elkraftsystem världen över. Genom kontakt med ABB via mejl kunde en doktorand inom transformatorer nås. Doktoranden kunde ge svar på frågor kring utveckling av transformatorer, på vilket sätt de kan utvecklas samt för- och nackdelar med de olika sätten.

4.4 Utveckling av laborationsuppgifterna

Genom analys av laborationen som ingick tidigare i kursen "Elkraftteknik I" och relevanta kapitel i kurslitteratur som studenterna läst fram till laborationstillfället kunde passande laborationsuppgifter skrivas. En viktig begränsning för den nya laborationen var att en del av de nya

uppgifterna skulle vara unika, dvs. inte vara en del av den gamla laborationen. Det visade sig vara lättare sagt än gjort då den äldre laborationen var utformad till att inkludera det mesta av teorin som studenterna läst inom ämnet. Istället fokuserades det på att vidareutveckla idéerna med uppgifterna. Den äldre laborationen innehöll uppgifter som handlade om mätning av parametrar under tomgångs- och kortslutningsprov för en enfastransformator. Enfastransformatorn är egentligen trefastransformatorn som används i laborationen med skillnaden att endast en fas anslutits till nätspänningen. Sedan fanns det uppgifter som gick ut på att Yy-koppla trefastransformatorn och ansluta en resistiv belastningen till den. En induktiv belastning ansluts till den Yy-kopplade transformatorn i nästa uppgift. Till sist Dy-kopplas transformatorn och körs i tomgång. Till laborationen hör flera förberedelseuppgifter som ska göras innan laborationstillfället.

Laborationsuppgifterna som utvecklats handlar om att analysera och beräkna parametrar och påverkan som belastningar har på transformatorn, samt hur faskompensering och olika sätt att göra Y- och D-kopplingar kan ha olika effekter på transformatorn. Uppgifterna, speciellt faskompensering och ändringar i hur kopplingarna görs kunde fås fram genom informationssökning. Faskompensering är en viktig del av strömöverföring vid längre sträckor samt i industrier eller anläggningar där det finns belastningar som skapar oönskade reaktiva effekter i systemen. Genom att ändra på hur kablarna sitter kan primär- eller sekundärspänningarna färförskjutas enligt önskade värden, exempelvis att sekundärspänning får ligga 30 grader före primärspänningen. Förberedelseuppgifterna togs fram som ett verktyg som studenterna kan använda till att utföra laborationsuppgifterna samt som ett sätt att se att de har de nödvändiga kunskaperna. De går ut på att rita upp kopplingarna som kommer att göras under laborationstillfället, läsa relevanta kapitel och beräkna ett antal parametrar som kan användas under laborationens gång.

5. Analys

I det här kapitlet analyseras problemen som uppstått under arbetets gång, vid utveckling av laborationsuppgifter samt studien om transformatorer. Det har funnits några mål för vad studien om transformatorer ska behandla som transformatorer och deras funktion samt användningsområden, utveckling av transformatorn för ökad miljövänlighet och till sist för information om de olika kopplingsätten som kan användas för en trefastransformator.

Tekniskt sett är det möjligt att analysera de olika kopplingsätten praktiskt genom att utföra laborationstester där trefastransformatorn kopplas enligt de olika kopplingsätten, Yy, Yd, Dy och DD-koppling. Med hjälp av ett oscilloskop är det möjligt att se primär- och sekundärspänningarnas samt fasspänningarnas faskurvor och via dessa få ett svar på hur spänningen ändras beroende på vilken kopplingstyp som används. Det krävs dock teoretiskt analys och informationssökning om var transformatorer som kopplas enligt dessa sätt kan användas och vilka fördelarna är.

5.1 Laborationsuppgifter

Det är viktigt att laborationsuppgifterna som skrivits ger studenten praktisk förståelse för sin teoretiska kunskap. Det innebär att studenten ska kunna använda kunskaperna som studenten förväntas kunna fram till laborationstillfället under laborationen för att lösa bl a räkneuppgifter och koppla upp transformatorn samt förstå vad och var spänningar, strömmar och effekter mäts.

5.2 Transformatorns utveckling

Det är viktigt att förstå vilka aspekter av transformatorn det är som går att utveckla eller ändra på för att få en mer ekonomiskt eller miljövänlig transformator. Eftersom transformatorn är en mycket gammal uppfinning finns det specifika sätt att utveckla den på. Lyckligtvis är transformatorn en viktig del av elkraft och högspänningsnät vilket gör det något enklare att finna information.

5.3 Problemanalys

5.3.1 Problem med utformning av laborationsuppgifter

Som tidigare nämnt handlar den nya laborationen om att undersöka transformatorn under olika belastningar och kopplingstyper. Till en början var dock flera uppgifter bara repeteringar fast vid olika kopplingssätt. Därför ändrades de till att fortfarande fokusera på kopplingstyper men att det endast ska anslutas belastningar då transformatorn är Yy-kopplad. Snart visade det sig att även om de nya uppgifterna passade laborationens ändamål så var de få och innehöll för många likheter med uppgifter från äldre laborationer. En analys av kurslitteraturen behövdes för att få reda på vilka nya uppgifter som kunde läggas i laborationen. Lättare sagt än gjort visade det sig eftersom den existerande laborationen var matnyttig och innehöll segment från alla möjliga delar av kapitlet om transformatorn. Något som saknades var en del om faskompensering, som används mycket i industrin till att minska reaktiva effekter och därmed kostnader. Efter en del informationssökning om hur faskompensering fungerar bestämdes att det skulle bli en del av laborationen.

6. Resultat och diskussion

Examensarbetet har haft två huvuduppgifter, den ena att skapa en ny laboration för kursen ”*Elkraftteknik I*” och den andra en studie om transformatorer. Genom att göra en analys av problem som uppstått under arbetets gång har lösningar för problemen kunnat hittas. Ett resultat har även fåtts för studien om transformatorer som går ut på att hitta lösningar på hur en transformator kan utvecklas inför framtiden genom teori- och informationssökning.

Problemen som uppstod vid utveckling av laborationsuppgifter löstes genom analys av kurslitteratur och teori som studenter förväntas kunna inför laborationen. Ett par uppgifter som innehåller teori som inte finns med i kurslitteratur kunde läggas till med en förklaringstext och basteori om ämnet.

Studien gav ett svar på hur en transformator kan utvecklas för en miljömässigt bättre framtid, både avseende ekonomi och miljö. Svaren kunde fås genom informationssökning i litteratur om elkraftsystem och elmaskiner, läsning om produkter och utveckling av dessa på hemsidor för olika företag som producerar och arbetar med elkraftsystem samt via intervju med doktorand inom transformatorer.

Det finns ett antal sätt som en transformator kan utvecklas på för att bli miljövänligare eller ekonomiskt sätt bättre.

1. Användning av miljövänligare oljor, där forskning och tester kan leda till användning i större utsträckning. Ökad användning av nedbrytningsbara oljor leder till minskade utsläpp vid produktion av oljeisolerade transformatorer. Eftersom oljan har en nedbrytningstid på 21 dagar är det ingen fara för miljön att göra sig av med den.
2. Utveckling av transformatorns byggnadsmaterial. Byggs transformatorerna med dyrare och hållfastare material så kommer det krävas mer energi vid tillverkning men eftersom transformatorn troligen kommer få en mycket längre livslängd jämfört med om den byggs av material av lägre kvalité kommer utsläppen vid tillverkning att försummas med tiden. Kombinerat detta med miljövänlig olja som isolering som kan förnyas vid föråldring blir miljöpåverkan desto mindre. Längre livslängd

leder till färre transformatorer som måste konstrueras och installeras på nytt.

3. Sänkning av förluster i ledningar. Ju mer effektförlusterna sänks desto mer användbar effekt (aktiv effekt). Ökad aktiv effekt leder i sin tur till att mindre spänning behöver tillföras i början av nät för att kompensera för förlusterna.
4. Sänkning av ekonomiska förluster, via arbete med analys av transformatorfel vilket leder till möjlighet att undvika felen och felorsakerna.

7. Slutsats

Målen med examensarbetet som var att utveckla en undervisningsmodul med laborationsuppgifter och tillhörande teoretisk genomgång om trefastransformatorn för kursen ”*Elkraftteknik I*” och samtidigt göra en studie om transformatorer har uppfyllts. Transformatorstudiens resultat har presenterats som olika delar som studerats. Laborationen kan läsas i appendix.

Transformatorstudien har visat att det finns ett antal sätt att utveckla en transformator på. I dagsläget arbetar flera företag med att komma på lösningar för att öka transformatorers miljövänlighet. Exempel på lösningar som tagits fram är byte av traditionell mineralolja mot vegetabilisk olja framställd av exempelvis raps eller solrosfrön samt användning av enheter som konverterar växelspanning i början av en kraftledning, dvs. vid kraftverket, till likspanning och tillbaka till växelspanning i området där spänningen distribueras.

Examensarbetet kan användas som grund för en studie om utveckling av transformatorer för bättre miljöeffektivitet samt lägre ekonomiska förluster.

8 Framtida vidareutveckling

I början av examensarbetet var en studie av transformatorer inte ett av målen med arbetet. Den delen tillkom efter att en annan del strukits, nämligen utveckling av en laboration om synkrongeneratorn. I framtiden skulle det vara bättre att välja uppgifter som hänger samman med varandra redan i förstudiefasen eller tidigare för en bättre planering. Exempelvis ett studiebesök eller intervjuer med kunniga på företag som ABB eller Siemens för utvinning av information om transformatorer, utveckling, miljövänlighet etc.

Källor

Referenser

- [1] 60076-1 IEC: 1993+A1 (1999):
”<http://www.rendong.cn/Uploadfile/200909/200997101031.pdf>” [2014-04-13]
- [2] *ABB Handbok Elkraft* (1998) – Gunnar Elfving. Del 2 – Kapitel 4 ”Transformatorer”
- [3] *ABB Handbok Elkraft* (1998) – Gunnar Elfving. Del 2 - Kapitel 6 ”Mättransformatorer”
- [4] A remarkable journey – Transportation of the world’s largest HVDC transformers; ”<https://www.youtube.com/watch?v=OfAo76bo6VM>” [2014-08-12]
- [5] Analysis of Transformer Failures:
”<https://www.hsb.com/TheLocomotive/AnAnalysisofInternationalTransformerFailuresPart1.aspx>” [2014-08-13]
- [6] Artikel: De gjorde 50 år gammal olja ny:
”<http://www.minimedia.se/abb/de-gjorde-50-ar-gammal-olja-ny>” [2014-04-28]
- [7] BIOTEMP: the greener, safer, longer-life transformer oil;
”<http://www.abb.com/cawp/seitp202/b6e0c46c231194d0c12578f70047ce19.aspx>” [2014-08-12]
- [8] *Elkraftshandboken Elmaskiner (2003)*. Anders Cronqvist. Kapitel 1: Transformatorn.
- [9] *Elkraftteknik (2002)* – Thomas Franzén. Kapitel 1 ”Enfas och trefas växelström”
- [10] *Elkraftteknik (2002)* – Thomas Franzén. Kapitel 2 ”Transformatorn”

- [11] *Experimental study of electrical properties of mineral and vegetable transformer oils (2013)* – Mirela Stefania Vihacencu, Alexandra Ciuriuc & Lauretiu Marius Dumitran.
”http://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/fulldc4_652882.pdf” [2014-05-27]
- [12] Green power for Victoria;
”http://www.siemens.com/innovation/en/publikationen/publications_pof/pof_spring_2006/infrastructures_articles/undersea_cables.htm”
[2014-08-12]
- [13] *MATERIAL SAFETY DATA SHEET (2009-07-24)*”<http://www.glidewell dental.com/downloads/msds/MSDS-Biotemps.pdf>” [2014-05-27]
- [14] Molenco AB – Elektrisk Isolation:
”<http://www.molenco.se/prodElekIsoPresspan.html>” [2014-04-27]
- [15] Nationalencyklopedin: blekjord.
”<http://www.ne.se/blekjord/130753>” [2014-04-28].
- [16] Nationalencyklopedin: urlakning.
”<http://www.ne.se/urlakning/336646>” [2014-04-28]
- [17] Transformatorservice AB:
”<http://www.transformatorservice.se/regenerering.pdf>” [2014-04-28.]
- [18] Transformers with vegetable oil (2012) – Siemens AB:
”http://www.siemens.com/innovation/en/news/2012/e_inno_1219_2.htm”
- [19] Vegetable oil transformer for ultra-high voltages (2013)- Siemens AB:”http://www.siemens.com/innovation/en/news/2013/e_inno_1321_2.htm”

Appendix 1

Det här kapitlet innehåller laborationen om trefastransformatorn som utvecklats under examensarbetets gång.

PM för laboration

Analys av transformatorn vid olika belastningar och kopplingsarter

Syfte: Syftet med laborationen är att skapa förståelse och ökad kunskap om transformatorn genom experimentering med olika kopplingsarter och belastningar samt mättningsövningar.

1. Inledning

Laborationen går ut på att laboranten ska få grundläggande kunskap om de olika kopplingsarterna, Yy, Yd, Dy och Dd-koppling, trefastransformatorn samt om olika belastningars påverkan på transformatorns omsättning, hur effektutvecklingen ändras och vad som händer med ström och spänning vid ökad belastning. Lasterna som ska anslutas till transformatorn är en resistiv, en induktiv- och en kapacitiv belastning. Laborationen ska även ge laboranten förståelse för hur faskompensering fungerar samt hur manuell förskjutning av primär- och sekundärspänningarna kan utföras.

Målet med laborationen är att ge studenten praktisk förståelse för sina teoretiska kunskaper.

1.1 Förkunskaper

Läs igenom kapitel 2 Transformatorn samt delar som har med de olika kopplingsarterna i kapitel 1 i kurslitteraturen Elkraftsteknik. Gör även förberedelseuppgifterna för den här laborationen.

2 Transformatorn

En transformators uppgift är att transformera spänning, från hög till låg och vice versa. Transformatorn används ofta i ställverk där dess uppgift är transformering av höga spänningar på upp till 800kV ned till lägre spänningar som sedan distribueras över området. Den används även i mindre lågspänningsanläggningar för transformering av 400V till 230V.

2.1 Transformatordata

Märkeffekt: 2kVA

Frekvens: 50Hz

Primärlindning: 230V, 3,03A, 330 varv, 1,9 Ω

Två sekundärlindningar, omsättningen för per lindning: 70V, 4,76A, 105 varv, 0,26 Ω

Kärnans tvärsnittsarea, $A_{FE} = 2,59 * 10^{-3} m^2$

Transformatorns läckreaktans överreducerad till sekundärsidan, $X_{k2} = 0,43\Omega$

3. Enfastransformatorn

Trefastransformatorn kan användas som en enfastransformator genom att endast använda en lindning istället för alla tre lindningar. Därför börjar vi med att endast använda en av transformatorns lindningar, för att mäta och analysera omsättningen under tomgång samt göra kortslutningsprov.

3.1 Bestämning av transformatorns omsättning i tomgång

Mät fasspänningen i primärlindningen och i sekundärlindningen och bestäm spänningsomsättningen mellan faslindningarna.

a) Beräkna varvtalsomsättningen med hjälp av transformatorns primära och sekundära lindningsvarv.

$$\frac{N_p}{N_s} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Mät fasspänningen i primär- och sekundärsidan och bestäm spänningsomsättningen.

$$U_p = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$U_s = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\text{Spänningsomsättningen } \frac{U_p}{U_s} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Stämmer den överrens med varvtalsomsättningen? $\underline{\hspace{2cm}}$

b) Rita enfastransformatorns förenklade ekvivalenta schema under tomgång och mät tomgångsströmmen, tomgångsspänningen och aktiva effekten i tomgång och beräkna magnetiseringsimpedansen

R_m , X_m och Z_m om primärresistansen R_1 försummas. Beräkna även skenbara och reaktiva effekten.

Mät nu effekten under tomgångskörning med hjälp av wattmetern.

$$I_{0p} = \text{_____ A}$$

$$P_0 = \text{_____ W}$$

$$R_m = \text{_____ } \Omega$$

$$X_m = \text{_____ } \Omega$$

$$Q_0 = \text{_____ VAR}$$

$$S_0 = \text{_____ VA}$$

$$Z_m = \text{_____ } \Omega$$

3.2 Kortslutningsprov av transformatorn

Vi ska kortsluta transformatorn och mäta transformatorns tomgångsspänning samt tomgångseffekt. Anslut primärsidan som föregående uppgift, men kortslut sekundärsidan genom att koppla ihop fasen. En vridtransformator måste anslutas till kretsen.

Ni ska mäta kortslutningsspänningen, kortslutningsströmmen och kortslutningseffekten med hjälp av en voltmeter, en amperemeter och en wattmeter.

<i>Uppmätt</i>		
U_k	I_k	P_k
	3A	

Börja med att kontrollera att vridtransformatorn ger minimal spänning. Slå på strömmen och öka spänningen försiktigt till det att ni får märkströmsvärdet, ca 3A. Mät därefter kortslutningsspänningen och kortslutningseffekten på transformatorns primärsida.

4. Trefastransformatorn

Ni ska nu koppla upp transformatorn enligt de olika kopplingsmetoderna, dvs. Y/Y, Y/D, D/Y och D/D-koppling. För varje kopplingsmetod ska analys med hjälp av oscilloskop göras för att få reda på skillnader mellan de olika kopplingsmetoderna. Under Y/Y-koppling kommer trefastransformatorn att belastas först med en resistiv, sedan en induktiv och till sist en kapacitiv belastning. Därefter kommer både den induktiva och den kapacitiva lasten att anslutas till kretsen för faskompensering. För varje belastning kommer mätningar att göras för undersökning av effekten som lasten utgör på transformatorn.

En överkursuppgift som behandlar manuell förskjutning av primär- och sekundärspänningarna kan göras om laboreringstiden räcker till.

4.1 Y-Y-koppling vid tomgång

Yy-koppla transformatorn men anslut ingen belastning till den. Använd era ritningar som ni förberett inför laborationen när ni ska koppla transformatorn enligt de olika kopplingssätten. Anslut den till 230/400V uttaget på nätaggregate i nätstationen. Vid Y-koppling är det möjligt att förse transformatorn med 400V. Varför är det möjligt att förse transformatorn med 400V vid Y-kopplad primärsida?

Använd oscilloskop till att se spänningarnas faskurvor och jämföra dem. Finns det någon förskjutning mellan spänningarna? Finns det någon förskjutning mellan faserna? Hur ser förskjutningen ut mellan primär- och sekundärsida?

Med hur många grader är spänningarna förskjutna?

Fas-Fas	Huvud-Fas	Primär-sekundär

4.2.1 Y-Y-koppling med resistiv last

Anslut nu den resistiva lasten till transformatorns sekundärsida.

Anslut den resistiva belastningen till transformatorn och mät huvudspänning, fasspänning, och ström. Mät även effekten. Börja vid låg ström och öka till max 2 A, gör mätningar däremellan.

U_h (V)	U_f (V)	I (A)	S (VA)	P (W)	Q (Var)	θ

4.2.1.1 Spänningsfallet vid resistiv belastning

Med hjälp av den beräknade fasförskjutningen, kortslutningsresistansen och läckreaktansen överreducerat till sekundärsidan, ska ni beräkna spänningsfallet hos transformatorn. Rita det ekvivalenta schemat för trefastransformatorn och beräkna sedan spänningsfallet med hjälp av formeln nedan.

$$\Delta U = \sqrt{3} * I_2 * (R_{2k} * \cos \varphi_2 + X_{2k} * \sin \varphi_2)$$

$$R_{2k} = R_2 + R_1 * \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \text{ och } X_{2k} = 0,43\Omega$$

Beräkna sedan sekundärspänningen och jämför med det uppmätta värdet. Använd det beräknade värdet för lindningsspänningen från förberedelseuppgifterna.

$$U_2 = U_{20} - \Delta U$$

Beräkna även transformatorns resistans- och reaktansspänningsfall, U_R respektive U_X med hjälp av ohms lag.

Spänningsfallet, ΔU	Sekundärspänningen, U_2

4.2.2 Y-Y-koppling med induktiv last

Koppla ur den resistiva belastningen och anslut den induktiva lasten till transformatorns sekundärsida. Mät spänning och ström och notera ändringar jämfört med då belastningen var resistiv. Har något ändrats? Varför?

Eftersom det finns risk för överhettning av lasten samt oljud bör ni inte få för höga strömmar.

Ska man öka eller sänka induktansen om man vill ha högre strömvärde?

U_h (V)	U_f (V)	I (A)	S (VA)	P (W)	Q (Var)	θ

4.2.2.1 Spänningsfallet vid induktiv belastning

Med hjälp av den beräknade fasförskjutningen, kortslutningsresistansen och läckreaktansen överreducerat till sekundärsidan, ska ni beräkna spänningsfallet hos transformatorn. Rita det ekvivalenta schemat för trefastransformatorn och beräkna sedan spänningsfallet med hjälp av formeln nedan.

Beräkna sedan sekundärspänningen och jämför med det uppmätta värdet.

Spänningsfallet, ΔU	U_{20}	Sekundärspänningen, U_{fs}

4.2.3 Y-Y-koppling med kapacitiv last

Koppla nu ur den induktiva lasten och anslut den kapacitiva belastningen till transformatorn. Mät spänning och ström och beräkna effekten. Ser du några ändringar jämfört med de andra belastningarna? Vad ändrades och vad tror du det beror på?

Vad händer med spänningen vid ökad kapacitans?

U_h (V)	U_f (V)	I (A)	S (VA)	P (W)	Q (Var)	θ

4.2.3.1 Spänningsfallet vid kapacitiv belastning

Med hjälp av den beräknade fasförskjutningen, kortslutningsresistansen och läckreaktansen överreducerat till sekundärsidan, ska ni beräkna spänningsfallet hos transformatorn. Rita det ekvivalenta schemat för trefastransformatorn och beräkna sedan spänningsfallet med hjälp av formeln nedan.

Beräkna sedan spänningen för primärsidan och jämför med det uppmätta värdet.

Spänningsfallet, ΔU	U_{20}	Sekundärspänningen, U_{fs}

4.2.4 Y-Y-koppling med induktiv och kapacitiv last

På de föregående uppgifterna anslöts de induktiva och kapacitiva belastningarna en i taget.

I den här uppgiften ska ni ansluta båda lasterna till transformatorn samtidigt. Ute i industrin och i anläggningar finnas det ofta många induktiva belastningar på transformatorerna som används, t ex elektriska motorers induktionslindningar, lysrör, driftdon, värmeelement med mera. Högre induktiv last medför större reaktiv effekt. För att motverka den höga reaktiva effekten krävs det att det sker en faskompensering i kretsen. Faskompensering innebär ökning av en belastnings effektfaktor, dvs att fasvinkeln minskas.

Det går att göra genom att parallellkoppla en kapacitiv belastning med den induktiva belastningen. Eftersom induktiv last förskjuter spänningen positivt medan kapacitiv last förskjuter den negativt kommer ökad kapacitiv last ge lägre fasvinkel ju närmare den induktiva belastningen den är i värde.

Anslut induktiva lasten till transformatorn och parallellkoppla den kapacitiva lasten med den. Mät därefter strömmen i kretsen, huvud- och fasspänningen på sekundärsidan, effekten och beräkna sedan den reaktiva och skenbara effekten samt fasförskjutningen. Börja med att ha en högre induktiv belastning och öka successivt den kapacitiva belastningen och notera resultatet. Försök få ström- och spänningskurvorna i fas genom ökning av den kapacitiva belastningen.

U_h (V)	U_f (V)	I (A)	S (VA)	P (W)	Q (Var)	θ

4.3 Y-D-koppling vid tomgång

Yd-koppla transformatorn men anslut ingen last till den.

Mät primär- och sekundärspänningarna. Använd oscilloskop till att se spänningarnas faskurvor och jämföra dem. Finns det någon förskjutning mellan spänningarna? Finns det någon förskjutning mellan faserna på primärsidan? Sekundärsidan?

Med hur många grader är spänningarna förskjutna?

4.4 D-D-koppling vid tomgång

Dd-koppla transformatorn men anslut ingen belastning till den. Även för Dd och Dy-kopplingarna ansluter ni 0-400V men inspänningen måste noggrant kontrolleras så den inte överstiger 230V. Varför ska ni endast använda 230V och inte 400V?

Mät primär- och sekundärspänningarna. Använd oscilloskop till att se spänningarnas faskurvor och jämföra dem. Finns det någon förskjutning mellan spänningarna? Finns det någon förskjutning mellan faserna på primärsidan? Sekundärsidan?

Med hur många grader är spänningarna förskjutna?

4.5 D-Y-koppling vid tomgång

Dy-koppla transformatorn men anslut ingen belastning till den.
Anslut den till 0-400V uttaget i nätstationen.

Mät primär- och sekundärspänningarna. Använd oscilloskop till att se spänningarnas faskurvor och jämföra dem. Finns det någon förskjutning mellan spänningarna? Finns det någon förskjutning mellan faserna på primärsidan? Sekundärsidan?

Med hur många grader är spänningarna förskjutna?

4.6 Manuell fasförskjutning av trefastransformatorn (extra)

Det är möjligt att manuellt skapa en fasförskjutning beroende på hur faserna kopplas. För att kunna veta hur mycket spänningen förskjutits läggs en siffra efter kopplingsnamnet, t ex Yy0 eller Yd11. Siffran efter kopplingsnamnet står för klockans timmar, 0-11. Varje timme står för en fasförskjutning. Eftersom det finns 12 timmar på en klocka tilldelas varje timme 30 grader. 1 står för 30 grader förskjutning, 2 för 60, 3 för 90 etc upp till 330 förskjutning efter primärsidan. 330 ned till 180 är samma som -30, -60, -90 etc, dvs. fasförskjutning före primärsidan. -180 eller 180 graders förskjutning innebär att sekundärspänningen ligger en halv våglängd ifrån primärspänningen. De vanligaste fasförskjutningarna som används är 0, 1, 5, 6 och 11 dvs. 0, 30, 150, 180 och -30 grader [1].

Förskjutningen sker genom att ändra på anslutningen, antingen på primär- eller sekundärkopplingen. Se bilaga 1 för de vanligaste kopplingsätten.

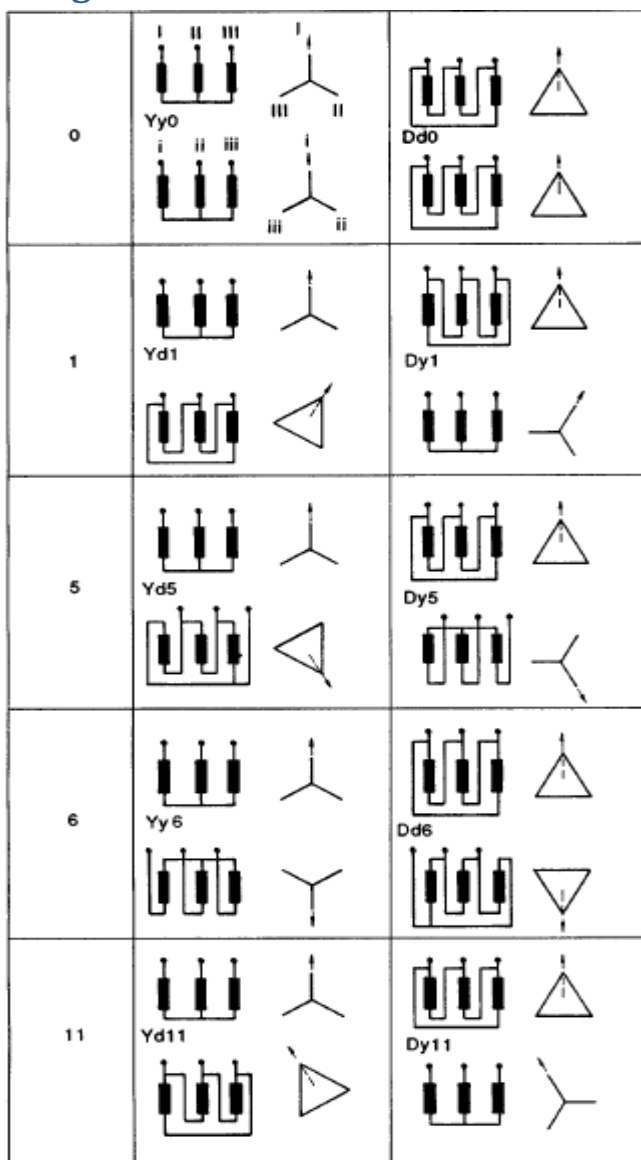
Uppgift: Uppgiften är att YY-koppla trefastransformatorn och förskjuta sekundärspänningen så att den ligger en halv våglängd efter primärspänningen och sedan använda oscilloskopet till att jämföra primär- och sekundärspänningarna till att se att kopplingen är rätt. Har din koppling medfört rätt förskjutning?

5. Förberedelseuppgifter

1. Läs igenom de delar som behandlar Y- och D-koppling och transformatorn i kapitel 1 och 2 i Elkraftteknik.
2. Rita trefastransformatorn då den är kopplad enligt de olika kopplingarna, dvs. Yy, Yd, Dd och Dy-kopplingarna.
3. Rita enfastransformatorn med kortsluten sekundärsida.
4. Beräkna kortslutningsimpedanserna, R_{k1} , X_{k1} och Z_{k1} med hjälp av de data som finns för transformatorn i labbPM. Kortslutningsströmmen kan väljas till 3A. Rita även förenklat ekvivalent schema med impedanserna reducerade till primärsidan.
5. Rita förenklat schema över transformatorn, överreducerad till sekundärsidan och beräkna lindningsspänningen U_{20} samt resistans- och reaktansspänningsfallet U_R respektive U_X .

Tips: Ohms lag gäller för beräkning av resistans- och reaktansspänningsfallet. För beräkning av lindningsspänningen, använd transformatorns märkvärden.

Bilaga 1

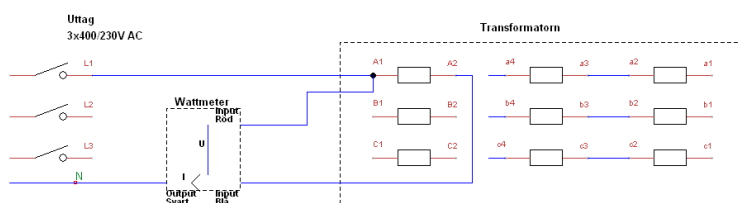


Bilaga 1. Figuren visar exempel på hur D och Y-kopplingarna kan ändras till att ge en fasförskjutning.

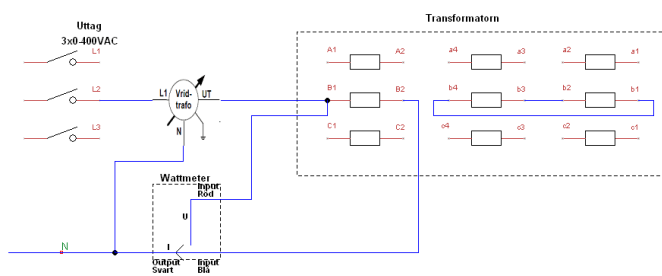
Bilaga 2

Bilaga 2 visar kopplingsscheman för de olika laborationsuppgifterna som utvecklats för det här examensarbetet. I kopplingsschemat för Yy-koppling ser det ut som att lasterna inte är kopplade till transformatorns sekundärsida men i verkligheten kommer lasterna anslutas till transformatorn en i taget, först motstånden, sedan spolen och sist kondensatorerna. De kopplas 1-1, 2-2 och 3-3, t ex a1-R1, a2-R2 och a3-R3.

Enfastransformatorn Tomgång

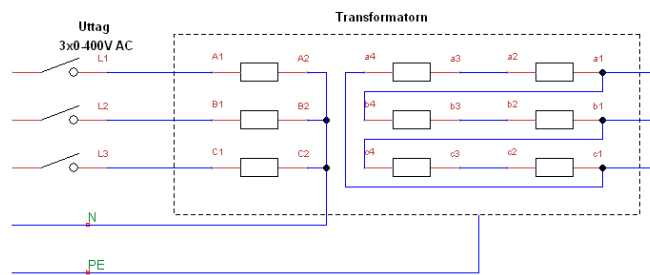


Trefastransformatorn Enfastransformatorn under kortslutningsprov



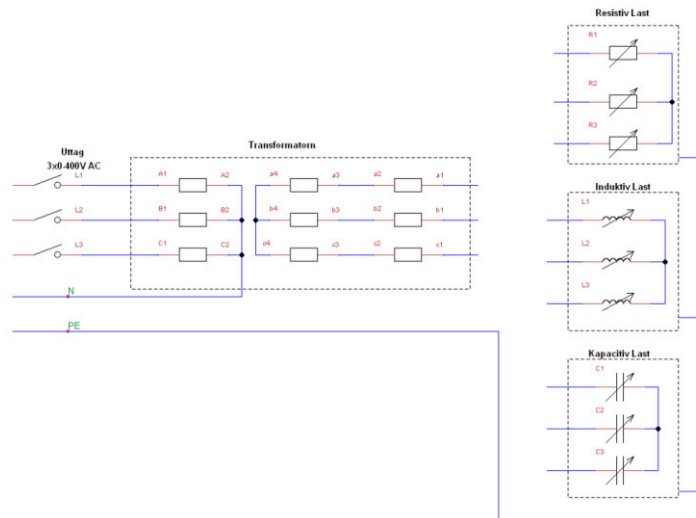
Trefastransformatorn

Yd-kopplad under tomgång



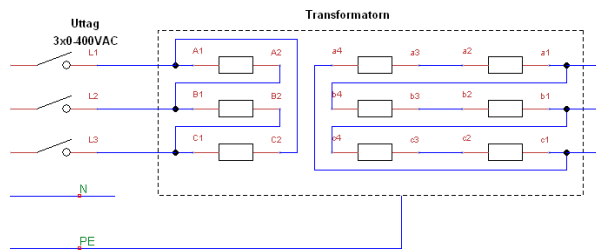
Trefastransformatorn

Yy-kopplad med resistiv, induktiv eller kapacitiv last



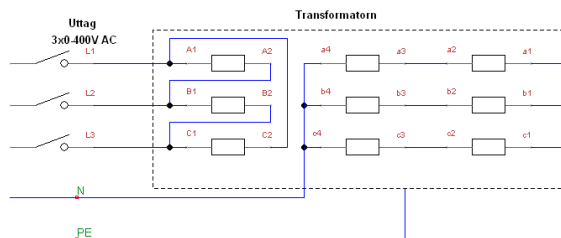
Trefastransformatorn

Dd-kopplad med resistiv, induktiv eller kapacitiv last



Trefastransformatorn

Dy-kopplad med resistiv, induktiv eller kapacitiv last



TRITA-STH-2014:64