



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

# Resonantsid elektrisüsteemides

Elektroenergeetika õppekava

Energiasüsteemide õppetool

Magistritöö

Õppetooli juhataja      prof. H. Tammoja

Juhendaja                dots. Ü. Treufeldt

Konsultandid

Lõpetaja                    A. Iljuhhin

Tallinn 2015

## **Autori deklaratsioon**

Deklareerin, et käesolev lõputöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituudile haridusastme lõpudiplomi taotlemiseks elektroenergeetika erialal. Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Lõpetaja (allkiri ja kuupäev) \_\_\_\_\_

# Lõputöö kokkuvõte

<p><i>Autor:</i> Artur Iljuhin</p> <p><i>Töö pealkiri:</i> RESONANTSID ELEKTRISÜSTEEMIDES</p> <p><i>Kuupäev:</i> 27.05.2015</p>	<p><i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö</p> <p>67 lk</p>
<p><i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool</p> <p><i>Teaduskond:</i> Energeetikateaduskond</p> <p><i>Instituut:</i> Elektroenergeetika instituut</p> <p><i>Õppetool:</i> Energiasüsteemide õppetool</p>	
<p><i>Töö juhendaja:</i> Ülo Treufeldt</p>	
<p><i>Sisu kirjeldus:</i></p> <p>Antud töö eesmärgiks on analüüsida erinevaid resonantsi ilminguid, anda ülevaade resonantside tüüpidest ning hinnata nende esinemist ja ohtlikkust. Käesoleva töö esimeses peatükis antakse ülevaade elektrisüsteemides asetleidvatest resonantsidest. Antakse ülevaade transformaatori karakteristikust ning kirjeldatakse erinevaid ferresonantside tüüpe. Seejärel kirjeldatakse lihtsat ferresonantsahelat ning antakse ülevaade erinevatest ferresonantsahela analüüsi meetoditest. Käsitletakse ferresonantsi tekkevõimalusi elektrisüsteemides ja loetletakse ferresonantsiga kaasnevaid probleeme. Teises peatükis antakse lühiülevaade ferresonantsi uurimise ajaloost ning kirjeldatakse meetmeid ferresonantsi ärahoidmiseks, leevendamiseks ja summutamiseks. Samuti antakse ülevaade erinevatest ferresonantsi summutamiseahelatest. Kolmandas peatükis räägitakse trafode ferresonantsist. Kirjeldatakse ferresonantsi tekkevõimalusi erinevate trafolülitusgruppide juures. Käsitletakse jõutrafo, induktiivse pingetrafo ning mahtvusliku pingetrafo ferresonantsi. Samuti kirjeldatakse trafo lülitamise järjekorra tähtsust ning räägitakse ka võimalikust ferresonantsist mahtvuslikes alajaamades ja maandatud neutraaliga alajaamades.</p>	
<p><i>Märksõnad:</i> Resonantsid, ferresonants, faasoranalüüs, lineaarne ahela analüüs, ferresonantsi summutamine, ferresonantsi leevendamine, ferresonantsi summutamiseahelad.</p>	

## Summary of the diploma work

<p><i>Author:</i> Artur Iljuhhin</p> <p><i>Title:</i> RESONANCES IN POWER SYSTEMS</p> <p><i>Date:</i> 27.05.2015</p>	<p><i>Kind of the work:</i> Master thesis</p> <p>67 pages</p>
<p><i>University:</i> Tallinn University of Technology</p> <p><i>Faculty:</i> Faculty of Power Engineering</p> <p><i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering</p> <p><i>Chair:</i> Chair of Power Systems</p>	
<p><i>Tutor(s) of the work:</i> Ülo Treufeldt</p>	
<p><i>Abstract:</i></p> <p>The aim of this paper is to analyse phenomenon of different resonances occurring in power systems and give an overview of various types of resonances, estimate appearances and threats of the phenomenon. In the first part of the paper, an overview of different modes of resonances occurring in power systems is given. An overview of transformer core steel magnetizing characteristics is provided and different ferroresonance modes are described. The simple ferroresonance circuit is illustrated and the study of the ferroresonant circuit using different analyses is presented. In addition, potential ferroresonance occurrence in power system is described and problems caused by ferroresonance are listed. In the second part of the paper, a short overview of ferroresonance studies history is given and different possibilities for mitigation, damping and prevention of ferroresonance are provided. Also an overview of different ferroresonance suppression circuits is presented. The third part of the paper focuses on transformer ferroresonance. Occurrence of ferroresonance in different types of transformer configurations is analysed. Furthermore, power transformer, inductive voltage transformer and capacitive voltage transformer ferroresonance is described. Also the importance of switching sequence is described and finally the paper presents possibilities of ferroresonance in capacitive substation and neutral grounded substation.</p>	
<p><i>Key words:</i> Resonances, ferroresonance, phasor analysis, linear circuit analysis, ferroresonance damping, mitigation of ferroresonance, ferroresonance suppression circuits.</p>	

# Sisukord

<b>Lõputöö ülesanne</b> .....	<b>7</b>
Teema põhjendus: .....	7
Töö eesmärk:.....	7
Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu: .....	7
Lähteandmed:.....	7
<b>Eessõna</b> .....	<b>8</b>
<b>Sissejuhatus</b> .....	<b>9</b>
<b>1. Resonantside tüübid</b> .....	<b>11</b>
1.1. Võrgusageduslik resonants .....	11
1.2. Kõrgemate harmoonikute resonants .....	12
1.3. Ferroresonants.....	13
1.3.1. Transformaatori karakteristik .....	14
1.3.2. Ferroresonantside tüübid .....	15
1.3.3. Ferroresonantsahel .....	18
1.3.4. Ferroresonantsahela analüüs .....	21
1.3.5. Ühe punkti töö .....	27
1.3.6. Tööpunktide muutmine transient olukorras .....	28
1.3.7. Ferroresonantsi kindlakstegemine ja tekkevõimalused elektrisüsteemides .....	28
1.3.8. Ferroresonantsiga kaasnevad probleemid .....	30
<b>2. Ferroresonants elektrisüsteemides</b> .....	<b>33</b>
2.1. Ferroresonantsiga võitlemine.....	33
2.1.1. Ferroresonantsi ajalugu .....	33
2.1.2. Ferroresonantsi ärahoidmine .....	33
2.1.3. Ferroresonantsi leevendamine .....	35
2.1.4. Ferroresonantsi summutamine .....	37
2.2. Ferroresonantsi summutamiseahelad .....	40
2.2.1. Metalloksiidpiirik (MO-piirik).....	40
2.2.2. Mehaaniliselt lülitatav takisti .....	40
2.2.3. Filterahel .....	40
2.2.4. Küllastusreaktor .....	41
2.2.5. PTC-Termistor ehk posistor .....	41
2.2.6. Ferroresonantsahela ümberseadistamine.....	42
2.2.7. Nulljärgnevusvoolu summutamine.....	43
2.2.8. Faasi summutamine.....	45
<b>3. Trafo ferroresonants</b> .....	<b>46</b>
3.1. Trafo ühendusviis ja ferroresonants.....	46
3.1.1. Trafo primaarmähis ühendatud kolmnurka .....	46
3.1.2. Trafo primaarmähis maandamata täht.....	47
3.1.3. Trafo primaarmähis maandatud täht.....	47
3.1.4. Maandatud tähtühenduses olev trafo ja liinifaaside vahelised mahtuvused .....	48
3.1.5. Trafo YNd-lülituses.....	49
3.1.6. Trafo YNyn-lülituses .....	49
3.1.7. Maandatud neutraaliga autotrafo ühendatud kolmnurka.....	49
3.1.8. Avatud kolmnurkühendusega pingetrafo .....	49
3.2. Jõutrafo ferroresonants .....	50
3.3. Induktiivse pingetrafo ferroresonants .....	50
3.3.1. Pingetrafo ferroresonantsoleku uurimus .....	51
3.3.2. Pingetrafo ferroresonants pingeühtlustuskondensaatoritega võimsuslülitis .....	52
3.3.3. Pingetrafo rakendus maandamata süsteemis.....	53
3.3.4. Isoleeritud neutraaliga võrku ühendatud pingetrafo .....	54
3.4. Mahtuvusliku pingetrafo ferroresonants .....	55

3.5.	Süsteemi ferroresonants konfiguratsioonid.....	57
3.5.1.	<i>Trafo lülitamise järjekord.....</i>	57
3.5.2.	<i>Ühine ühendus koormamata liini ja trafo vahel.....</i>	58
3.5.3.	<i>Trafo kõrgepingepoolel ühefaasiline lühis, keskpingepoolel pingetrafo.....</i>	58
3.5.4.	<i>Mahtuvuslikud alajaamad.....</i>	59
3.5.5.	<i>Maandatud neutraaliga alajaam.....</i>	60
	<b>Lõputöö kokkuvõte.....</b>	<b>61</b>
	<b>Kirjandus.....</b>	<b>64</b>

# Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	<b>Resonantsid elektrisüsteemides</b>
Üliõpilane:	<b>Artur Iljuhhin 132365AAVMM</b>
Lõputöö juhendaja:	<b>Ülo Treufeldt</b>
Õppetool:	<b>Energiasüsteemide õppetool</b>
Õppetooli juhataja:	<b>Heiki Tammoja</b>
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>27.05.2015</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppetooli juhataja (allkiri)

## Teema põhjendus:

Elektrivõrkudes esineb rida rikkeid, mis on põhjustatud resonantsnähtustest. Elektrivõrgu töökindluse tõstmiseks oleks vaja uurida resonantsnähtuste tekkimist soodustavaid tingimusi ja uurida resonantsist põhjustatud võrgurikkeid. Eesti elektrivõrkudes on resonantsnähtuseid uuritud vähe ja seetõttu on teema aktuaalne ning võrgutöökindluse tõstmise seisukohalt oluline. Töös analüüsitakse erinevaid resonantsi ilminguid ja antakse hinnang nende esinemisele ja ohtlikkusele.

## Töö eesmärk:

Töö eesmärgiks on anda ülevaade elektrisüsteemides aset leidvatest resonantsidest.

## Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Anda ülevaade erinevatest resonantside tüüpidest.

Analüüsida resonantside tekkepõhjuseid.

Analüüsida erinevaid meetmeid resonantsi ennetamiseks, vältimiseks ja summutamiseks.

## Lähteandmed:

Töös kasutatakse kirjandusallikatest saadud informatsiooni. Teabeallikad on võetud TTÜ andmekogust ja leitud internetist.

## Eessõna

Magistritöö teema pakkus välja juhendaja Tallinna Tehnikaülikooli dotsent Ülo Treufeldt. Eesti elektrivõrkudes on resonantsnähtuseid uuritud vähe ja seetõttu on teema aktuaalne ning võrgutöökindluse tõstmise seisukohalt oluline. Antud töös kasutatud materjalid on võetud TTÜ andmekogust ja leitud internetist.

Autor soovib tänada oma juhendajat Ülo Treufeldtit.

Kõik lõputööd puudutavad küsimused, kommentaarid ja teated palun edastada e-posti aadressile.

Artur Iljuhhin

Punane 9-31, 13620 Tallinn, Harjumaa

artur.iljuhhin@eesti.ee

+372 56466788



## Sissejuhatus

Resonantsnähtus on lineaarne nähtus, kus mahtuvustakistus ja induktiivtakistus saavad võrdseks, põhjustades liigpingeid ja -voole. Üldjuhul tekib resonants kõrgematel harmoonikutel. Võrgusageduslik resonants esineb ainult harvadel juhtudel seoses riketega. Kuna tegemist on lineaarse nähtusega, kus sageduse kasvades mahtuvustakistused vähenevad ja induktiivtakistused suurenevad, siis on võimalik lihtsalt välja arvutada sagedus, millel resonants aset leiab. Ferroresonants on mittelineaarne resonantsi fenomen, mis võib aset leida igal sagedusel ja mõjutada elektrisüsteemi. Ferroresonantsi peamine tunnusjoon on see, et samade võrguparameetrite juures on võimalik mitu erinevat stabiilset talitluspiirkonda, mis sõltuvad ahela parameetritest ja algseisundist.

Ferroresonants tekib elektrisüsteemides, mis sisaldavad mahtuvust ja mittelineaarset induktiivsust. Mittelineaarset induktiivsusi sisaldavad jõutrafad, pingetrafad ja šunteerivad reaktorid. Mahtuvusi sisaldavad elemendid on kaablid, õhuliinid, mahtuvuslikud pingetrafad, piki- või põikkondensaatorid ja mahtuvuslikud pingejagurid lülitites. Ferroresonants leiab aset palju tihedamini kolmefaasilises süsteemis kui ühefaasilises.

Ferroresonants on keeruline elektriline fenomen, mis on kaua olnud probleemiks elektrisüsteemides. Ferroresonantse võivad vallandada välguliigpinged, trafode ja koormuste sisse- ja väljalülitamine, lühiste tekkimine ja väljalülitamine, pingevalused tööd, ühefaasiline lülitamine ning võrgu maanduse kadumine. Kogemuste ja uuringute põhjal on välja selgitatud süsteemi konfiguratsioonid, mis on rohkem altid ferroresonantsile.

Ferroresonantsi on uuritud juba terve sajand. Esimesed teadusartiklid, mis rääkisid resonantsidest trafodes, hakkasid ilmuma aastast 1907. Termin ferroresonants võeti kasutusele 1920-ndatel. Sellest ajast alates on avaldatud väga palju erinevaid teadusartikleid, mis kirjeldavad fenomeni olemust, pakuvad analüüsimeetodeid või kirjeldavad võimalikke juhtumeid. Hiljutisemad uurimised on jaotunud kahte põhilisse leeri: trafo mudelite täiustamine ning ferroresonantsi uurimine elektrisüsteemi tasandil. Vaatamata suurele kirjanduse hulgale on ferroresonants endiselt suuresti tundmatu ning tekib juhuslikult. Ferroresonantsi juhtumeid on dokumenteeritud väga vähe, sest teadmised selle tekkimisest on endiselt puudulikud. Vähesed teadmised jätavad ferroresonantsi tähelepanuta juba elektrisüsteemi disainimise ja planeerimise käigus.

Tehnika arenguga on elektrisüsteeme väga palju täiustatud. Suurenenud on maa-aluste kaablite kasutamine ja ülekandeliinide pingete suurus ning kasutusele on võetud ülekandeliinide reaktiivkompenseerimine. Paranenud on ka trafo disain ja kasutatav materjal. Selle tagajärjel on suurenenud ka ferroresonants ilmingud.

Antud töö eesmärgiks on analüüsida erinevaid resonantsi ilminguid, anda ülevaade resonantside tüüpidest ning hinnata nende esinemist ja ohtlikkust.

Käesoleva töö esimeses peatükis antakse ülevaade elektrisüsteemides asetleidvatest resonantsidest. Antakse ülevaade transformaatori karakteristikust ning kirjeldatakse erinevaid ferresonantside tüüpe. Seejärel kirjeldatakse lihtsat ferresonantsahelat ning antakse ülevaade erinevatest ferresonantsahela analüüsi meetoditest. Käsitletakse ferresonantsi tekkevõimalusi elektrisüsteemides ja loetletakse ferresonantsiga kaasnevaid probleeme.

Teine peatükk on pühendatud ferresonantsile. Antakse lühiülevaade ferresonantsi uurimise ajaloost ning kirjeldatakse meetmeid ferresonantsi ärahoidmiseks, leevendamiseks ja summutamiseks. Samuti antakse ülevaade erinevatest ferresonantsi summutamiseahelatest.

Kolmandas peatükis räägitakse trafode ferresonantsist. Kirjeldatakse ferresonantsi tekkevõimalusi erinevate trafolülitusgruppide juures. Käsitletakse jõutrafo, induktiivse pingetrafo ning mahtvusliku pingetrafo ferresonantsi. Samuti kirjeldatakse trafo lülitamise järjekorra tähtsust ning räägitakse ka võimalikust ferresonantsist mahtvuslikes alajaamades ja maandatud neutraaliga alajaamades.

# 1. Resonantside tüübid

Resonants esineb ahelates, kus induktiiv- ja mahtuvustakistus saavad võrdseks. Eristatakse rööpresonantsi ja jadaresonantsi. Rööpresonants tekib, kui võrdse takistusega mahtuvus ja induktiivsus on ühendatud rööpselt. Sellises ahelas on mahtuvuslik vool võrdne induktiivse vooluga ja nende voolude summa on null. Rööpresonantsi kasutatakse keskpingevõrkudes mahtuvusliku maaühendusvoolu kompenseerimiseks Peterseni pooli induktiivse vooluga, aga ka mitmesugustes filtrites. Rööpresonantsi nimetatakse ka vooluresonantsiks. Jadaresonants esineb ahelates, kus induktiivsus ja mahtuvus on jadaühenduses ja nende omavõnkesagedus on lähedane võrgus esinevale sagedusele. Resonantsolukorras saavutab vool suurima väärtuse, vastavalt suurele voolule, tekivad elementidel suured pinged, mis tavaliselt kvalifitseeruvad liigpingeteks ning seetõttu nimetatakse jadaresonantsi ka pingeresonantsiks. [1]

Resonantsi olukorras on induktiivpinge ja mahtuvuspinge võrdsed ja vastassuunalised. [1]

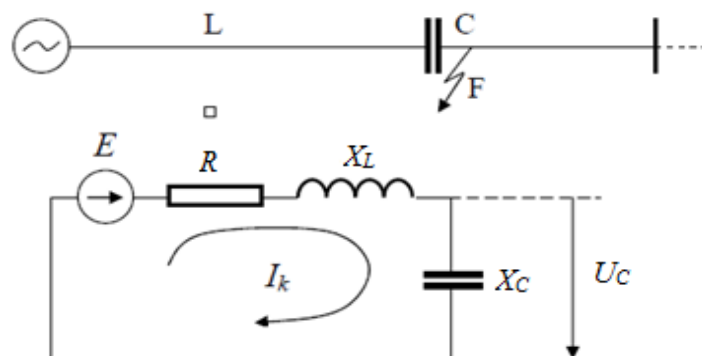
$$\omega_{res} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.1)$$

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.2)$$

Seega võib resonants tekkida nii jadaühenduses olevate mahtuvuste ja/või induktiivsuste muutmise kui ka sageduse muutumise tagajärjel. [1]

## 1.1. Võrgusageduslik resonants

Võrgusageduslik resonants, olenevalt riigist kas 50 Hz või 60 Hz, võib esineda ainult harvadel juhtudel, seoses riketega. Näiteks, lühis pikal kõrgepingeliinil, millel on mahtuvuslik pikikompensatsioon on näidatud joonisel (Joonis 1.1). [1]



Joonis 1.1. Pikikompenseeritud liini lühis [1]

Pikimahtuvusega kompenseeritakse pika liini induktiivtakistust osaliselt, millega parandatakse liini ülekandevõimet. Kui liinis tekib lühis, siis liini koguinduktiivsus väheneb (liin „lüheneb“) ning induktiivsuse ja mahtuvuse omavõnkesagedus võib läheneda võrgusagedusele, tekitades liini resonantsi. Resonantsi tagajärjel muutub summaarne reaktiivtakistus nulliks ja lühisvool suureneb. [1]

$$I_k = \frac{E}{R} \quad (1.3)$$

Selle tulemusel tekib kondensaatoril liigpinge  $U_C$

$$U_C = I_k X_C = I_k \frac{1}{\omega C} \quad (1.4)$$

Tekkiv liigpinge ohustab kondensaatori isolatsiooni ja seetõttu kaitstakse selliseid pikikompenseerimiskondensaatoreid liigpingepiirikutega. [1]

## 1.2. Kõrgemate harmoonikute resonants

Kõrgemateks harmoonikuteks nimetatakse põhiharmooniku ehk võrgusageduse  $f_1$  täisarvkordseid  $h$  sagedusi: [1]

$$f_h = hf_1 \quad (1.5)$$

Kõrgemate harmoonikute resonantsi allikaks on induktiiv- ja mahtuvuslike takistuste sõltuvus sagedusest: [1]

$$X_{Lh} = 2\pi f_h L \quad (1.6)$$

$$X_{Ch} = \frac{1}{2\pi f_h C} \quad (1.7)$$

kus

$X_{Lh}$  ja  $X_{Ch}$  on  $h$ -ndale harmoonikule vastav induktiiv- ja mahtuvuslik takistus;

$f_h$  on  $h$ -nda harmooniku sagedus;

$L$  ja  $C$  on ahela induktiivsus ja mahtuvus.

Sageduse kasvades mahtuvustakistused vähenevad ja induktiivtakistused suurenevad.

Resonantsisagedusel suureneb harmooniku amplituud ohtlikult, kui  $f_h = f_{res}$ . Aktiivtakistuse võib lugeda muutumatuks kuni üheksanda harmoonikuni, edasi pääseb mõjule pinnaefekt ja aktiivtakistus suureneb. [1]

Kõrgemate harmoonikute rööpresonantsi võib põhjustada võimsustegurit parandavate põikkondensaatoreite ja trafo ühendus. Kõrgemate harmoonikute paralleelresonants võib tekkida

juhul, kui lülitatakse ümber põikkondensaatoreid või lisatakse võrku uusi induktiivsusi (mootoreid, reaktoreid või trafosid). [1]

Rööpresonantsi tulemuseks on: [1]

- toitepinge kvaliteedi oluline langemine [suur THD (*Total harmonic distortion*)];
- elektriseadmete tõrked ja enneaegsed rikked;
- resoneeriva harmooniku suur vool läbi trafo – soojuslik ülekoormus;
- kondensaatorpatarei rikked;
- releede ja võimsuslülitite soovimatud rakendumised.

### 1.3. Ferroresonants

Termin ferroresonants ilmus esmakordselt 1920-ndatel. Ferroresonantsiks on vaja ahelat, mis sisaldab mittelineaarset induktiivsust, mahtuvust, pingesallikat ja madalaid kadusid. Elektrivõrk sisaldab palju mitmesuguseid magnetahelate küllastumisega seotud mittelinearseid induktiivsusi nagu jõutrafod, pingetrafod ja šunteerivad reaktorid. Mahtuvusi sisaldavad elemendid on kaablid, õhuliinid, mahtuvuslikud pingetrafod, piki- või põikkondensaatorid, mahtuvuslikud pingejagurid lülitites ja metallkestas jaotlad. Ferroresonantse võivad vallandada välguliigpinged, trafode ja koormuste sisse- ja väljalülitamine, lühiste tekkimine ja väljalülitamine, pingesalused tööd, ühefaasiline lülitamine ning võrgu maanduse kadumine. [1]

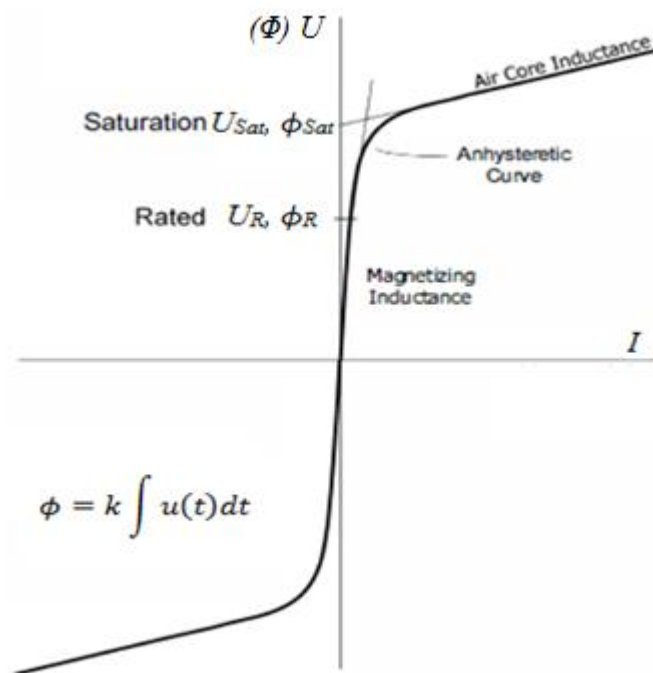
Ferroresonants tähendab pinget ja voolu järsku hüpet võrgusageduslikust püsitalitlusest suurte liigpingete ja harmoonikute tasemega resonantstalitusse. [1] Ferroresonants on väga tundlik süsteemi algarvete suhtes, nagu magnetvoog südamikus, lülituse aeg, trafo ühenduse tüüp, võrgukaod ja mahtuvuse laengu suurus. [2] [3] Ferroresonants võib põhjustada süsteemi seadmete ülekuumenemise ja riknemise ning seada ohtu ka teenindava personali. Samuti võib ferroresonants viia kaitsele eksitamiseni, põhjustades vale signaalväljundi. [4] Praktikas on sagedasemaks ferroresonantsi põhjustajaks pingetrafo väljalülitamine võimsuslülitite kaudu. Kuna pingetrafo võib väljalülitamise käigus jääda mõneks ajaks ühendatuks lülitite pingesalustuskondensaatoritega, siis võib selle tulemusel tekkida kõrge harmoonimoonutuste tasemega normaalsest pingest oluliselt suurema amplituudiga resonantsliigpinge. [1]

Ferroresonantsi vältimiseks on vaja tunda ferroresonantsi olemust, osata ferroresonantsi prognoosida, ära tunda ja vältida. Ferroresonantsi nähtust elektrisüsteemides on raske kirjeldada, kuna see esineb harva ja juhuslikult ning seda ei saa täpselt ennustada, analüüsida ega modelleerida. Puudujäägid teadmistes tähendavad, et ferroresonantsi peetakse vastutavaks paljude justkui seletamatutel põhjustel tekkinud rikete korral. Resonantsi ja ferroresonantsi vahel

vahetegemisel tuleb märgata ferresonantsile spetsiifilisi ja teinekord üllatavaid tunnusoone. Ferresonantsi riski hindamiseks tuleb kindlaks teha elektrisüsteemi potentsiaalselt ohtlikud konfiguratsioonid. [1]

### 1.3.1. Transformaatori karakteristik

Trafo südamiku magneetimiskõvera karakteristikut kujutatakse magnetvootihedusena  $B$  vs magnetvälja tugevusena  $H$ . Andmete kasulikuks kasutamiseks elektrisüsteemi uurimisel on tarvis voltamper karakteristikut töösagedusel. [4] [5]



**Joonis 1.2. Trafo magneetimiskõvera voltamper karakteristik [4]**

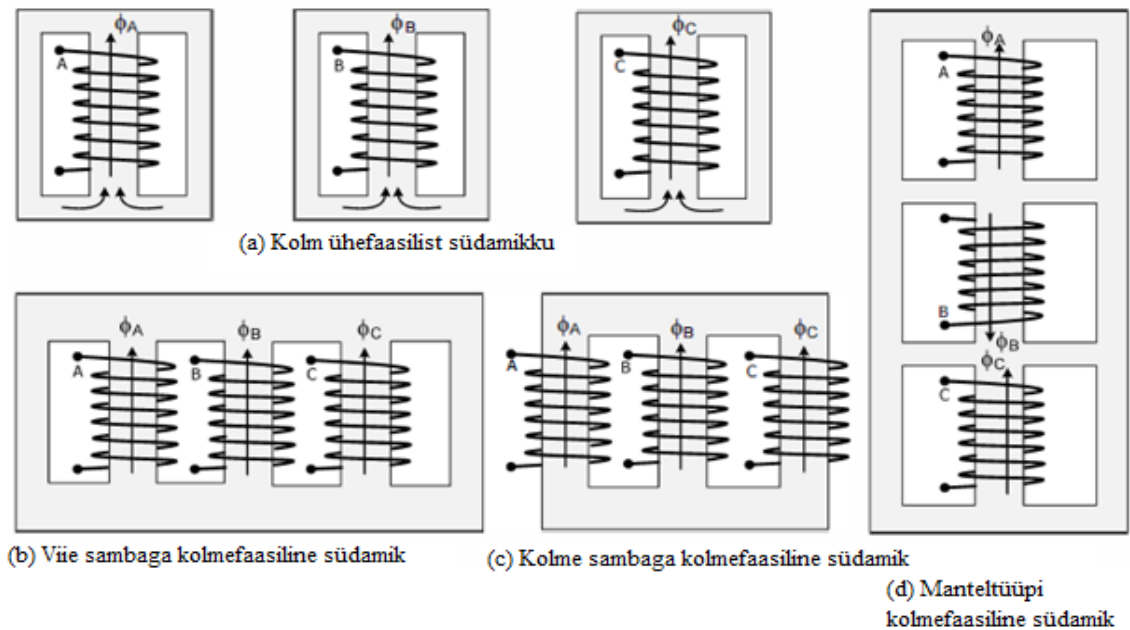
Joonisel (Joonis 1.2) on kujutatud trafo voltamper karakteristik töösagedusel. Magneetimiskõver on seotud valemiga (1.8), kus pinge  $U$  tekitab magnetvoo  $\Phi$  ning seob magneetimiskõvera vooluga  $I$  kindlale sagedusele. [4]

$$\phi = k \int_{t_1}^{t_2} u(t) dt + \phi_0 \quad (1.8)$$

kus  $k$  on südamiku konstant,  $u(t)$  on rakendatud pinge ja  $\phi_0$  on jääkvoog.

Joonisel (Joonis 1.2) olev magneetimiskõvera koguinduktants  $X_M$  koosneb kahest osast, magneetimisinduktants (*magnetizing inductance*) ja õhksüdamiku induktants (*air-core inductance*). Magneetimisinduktants  $X_{M,US}$  on induktants, kus magnetvoog on küllastuspiirist  $\phi_{sat}$  allpool ning trafo südamik ei ole küllastunud. Õhksüdamiku induktants  $X_{M,S}$  on induktants, kus magnetvoog  $\phi_{sat}$  on küllastuspiirist kõrgemal ning südamik loetakse küllastunuks. [4]

Trafo südamiku kuju ja ühendusviis mõjutab samuti tööarakteristikut. Mõned enimkasutatavad trafo disainid on näidatud joonisel (Joonis 1.3). [4]



**Joonis 1.3. Levinud trafo südamike disainid [4]**

Joonisel (Joonis 1.3a) on kolm ühefaasilist südamikku, mis on magnetiliselt sõltumatud. Ülejäänud mudelite puhul on kõik faasid magnetiliselt sõltuvad ning avaldavad mõju üksteisele. Kolmefaasilise mudeli tasakaalust väljaminemisel tekib nulljärgnevusvool, mis võib viia südamiku küllastumiseni. Transient või ferroresonants olukorra kujutamisel võib kolmemähiselise trafo kujutamine, kolme ühefaasilise mähisena, viia suurte arvutusvigadeni. Samuti tuleb suurt tähelepanu pöörata erinevate südamike kujudele. [4]

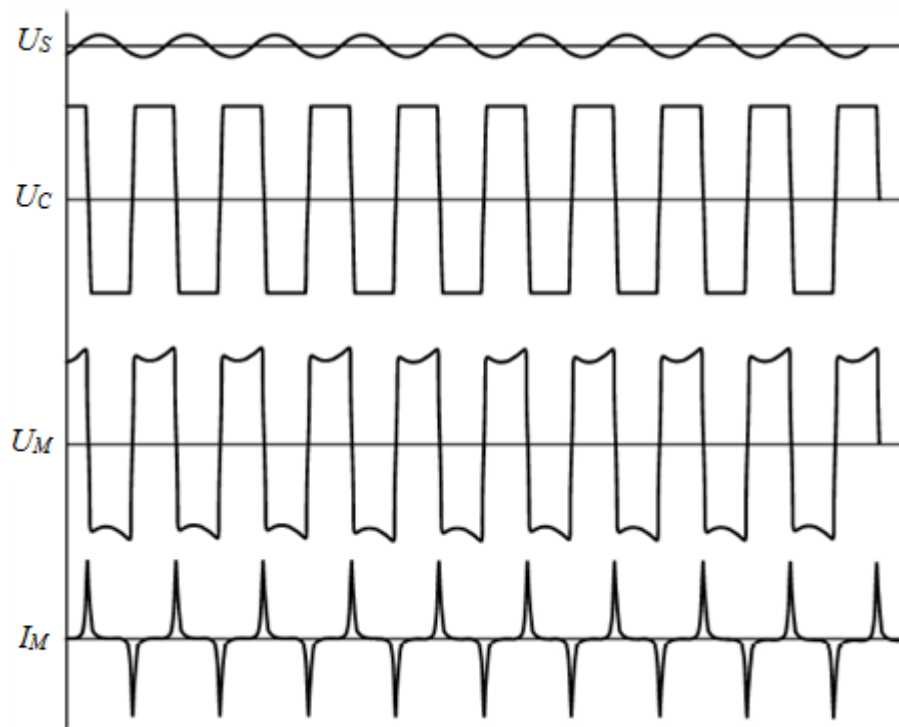
### 1.3.2. Ferroresonantside tüübid

Trafo töö ferroresonantsolekus sõltub mitmest tegurist, nagu, süsteemi pinge kõikumise ulatus, algne kondensaatori pingeline, trafo magneetimiskarakteristiku algne seisund, kaod ferroresonantsahelas ja pingelaine asukoht lülitamise ajal. Ferroresonantsi protsess algab tavaliselt mingi lülituse käigus, nagu näiteks trafo pingestamine, ühefaasiline lülitus, vea kõrvaldamine, kaitserike või maanduse kadu. Ferroresonantsi liigitatakse pingelaine spektraalse koosseisu järgi nelja eri klassi: põhiseduslik, subharmooniline, kvaasiperioodiline ja kaootiline resonants. [4]

#### Põhiseduslik resonants

Põhiseduslik resonants on enamlevinud ferroresonantsolek, mida on ka kõige lihtsam analüüsida. Joonisel (Joonis 1.4) on näidatud põhiseduslik ferroresonants. Ferroresonantsi

pinge lainekuju  $U_M$  võngub võrgupinge lainekuju  $U_S$  sagedusel ning on ka üks osa sellest. Lainekuju positiivne ja negatiivne pool on üldiselt sümmeetrilised, aga osadel juhtudel on täheldatud ka asümmeetriat. Ferroresonantsipinge on vastupidise polaarsusega, kuna võrgupinge faasinihe on tingitud võrgu aktiivtakistuse pingelangust. Ferroresonantsipinge on kordades suurem võrgupingest, põhjustades ohtu seadmetele. Samuti võib püsiv ferroresonantsolek viia isolatsiooni kahjustuseni. [4]

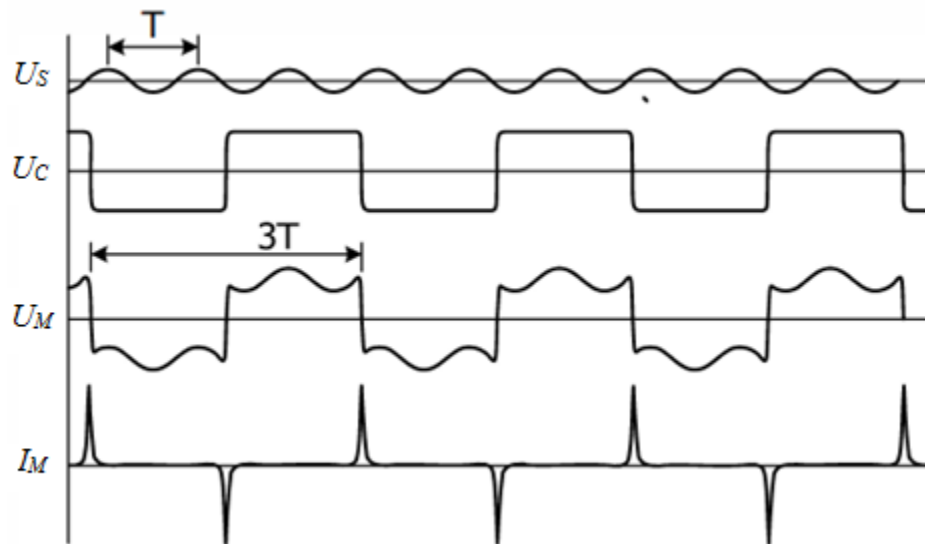


**Joonis 1.4. Põhisageduslik ferroresonants [4]**

#### Subharmooniline resonants

Subharmooniline resonants hõlmab endas põhisagedusest perioodiliselt suuremaid võnkumisi. Subharmooniline resonants perioodiga  $3T$  (16,33 Hz) on kujutatud joonisel (Joonis 1.5). Positiivne ja negatiivne poolperiood võib olla nii sümmeetriline kui ka asümmeetriline. [4]

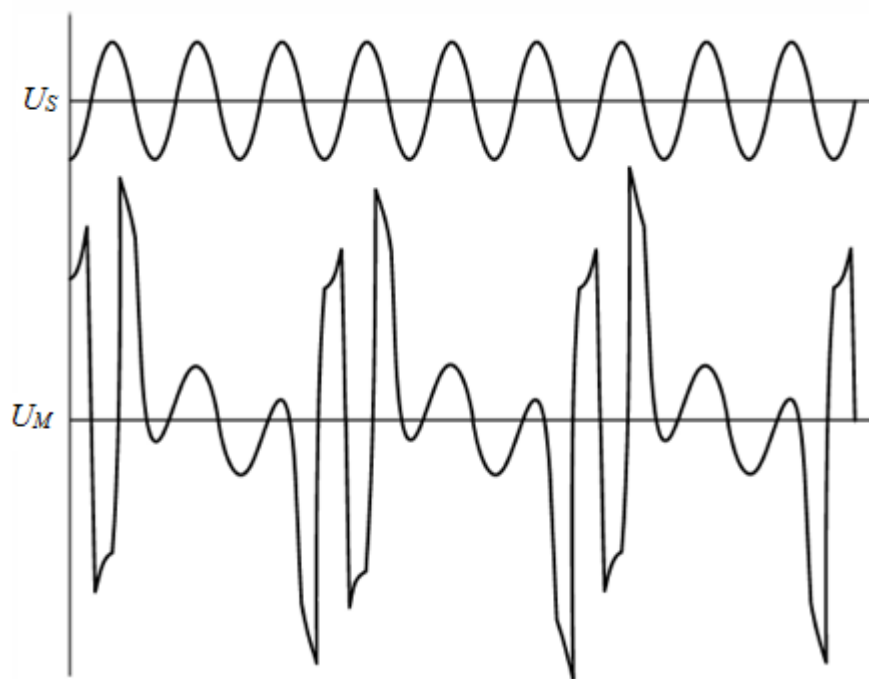




**Joonis 1.5. Subharmooniline ferroresonants [4]**

#### Kvaasiperioodiline resonants

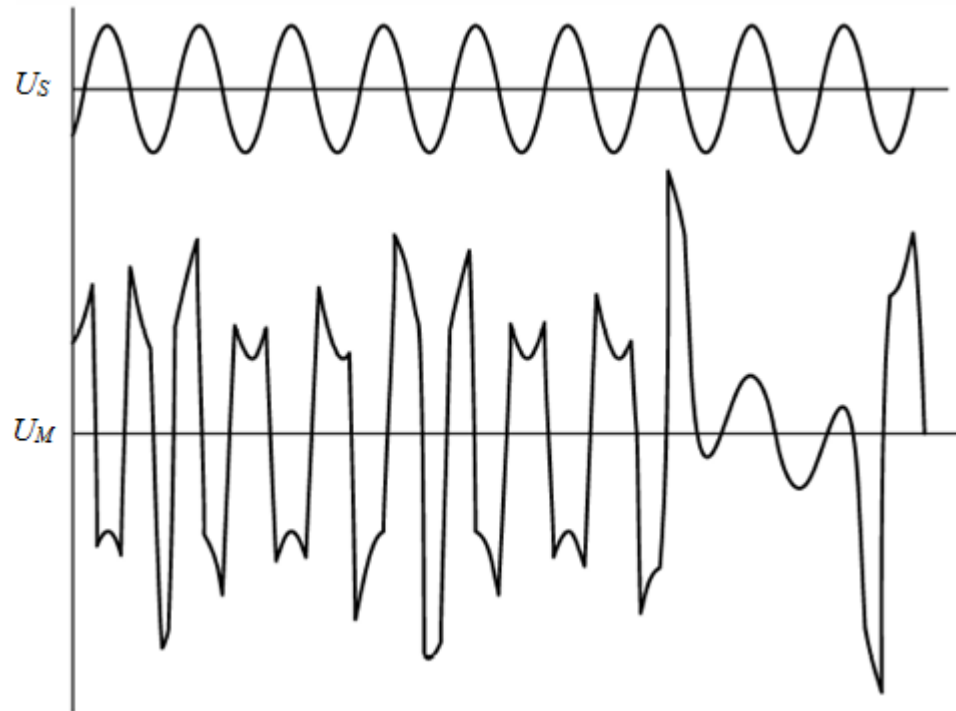
Kvaasiperioodiline resonants on katkendliku spektriga, kus sagedused on kombineeritud mitmest irratsionaalarvulisest sagedusest. Mõned kõverjooned kvaasiperioodilisest ferroresonantsist on kujutatud joonisel (Joonis 1.6). Lainekujul on korduv muster, aga erinevad tipud, igal kordusel ning perioodid, mis samuti ei ole võrdsed. [4]



**Joonis 1.6. Kvaasiperioodiline ferroresonants [4]**

### Kaootiline resonants

Kaootilise ferroresonantsi puhul on lainepikkused mitteperioodilised ning lainekuju omab ka erinevaid tipupingeid ehk nagu nimi ka ütleb, muutuvad kõik suurused ebakorrapäraselt ehk kaootiliselt. Mõnedel juhtudel võib see protsess kesta lõpmatuseni. Kaootiline ferroresonants on kujutatud joonisel (Joonis 1.7). [4]



**Joonis 1.7. Kaootiline ferroresonants [4]**

Ferroresonantsi tüüp sõltub vooluahelast, võrguelementide parameetritest ja algtingimustest. Ferroresonantsi tüübi muutumist võivad põhjustada juba väikesed võrguparameetrite või siirdeprotsessi muutused. Sagedamini esinevad põhisageduslik ja subharmooniline resonants. [1]

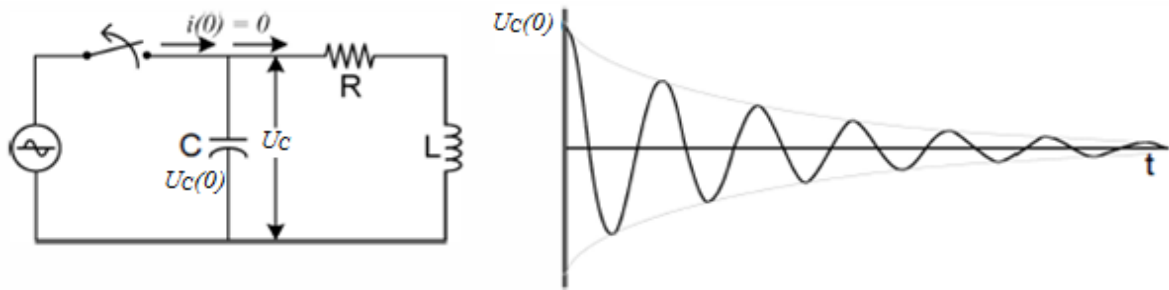
#### **1.3.3. Ferroresonantsahel**

Ferroresonantsi puhul tekib enamikel juhtudel elektrisüsteemis jadaühendus küllastatava induktiivsuse ja mahtuvuse vahel, kus mahtuvus pingestatakse läbi trafo magnetimisinduktsiooni. [6] Hetkest, kui trafo tuleb mängu, saab koguidektants  $X_M$  olla, kas trafo magnetkarakteristiku küllastunud  $X_{M,S}$  või mitteküllastunud  $X_{M,US}$  olekus või mõni vahepealne suurus, tekitades erinevad süsteemi seisundeid. [5] Ferroresonants võib tekkida elektrisüsteemis ajutiste liigpingete ajal. Kolmefaasilise trafo normaaltalitusel on magnetimisinduktiivsus rööbiti süsteemi mahtuvustega ja trafo pinget hoitakse alla tema küllastuse piiri. Ajutiste liigpingete ajal ei pruugi süsteem hoida pinget normaalväärtuste piirides ning trafo satub küllastusse. Tekib energia ülekannet süsteemi mahtuvuse ja trafo mittelineaarse

magneetimisinduktiivsuse vahel. Suured magnetvoo muutused sellel perioodil võivad viia süsteemi liigpingeteni. Kuna sellisel juhul on takistus ja mahtuvus paralleelselt ühendatud, siis nimetatakse seda rööpühenduse ferresoantsiks. [6]

Joonisel (Joonis 1.8) on kujutatud tavaline RLC ahel, kus induktiivsus  $L$  on lineaarne ehk vool ja pinge on sagedusest sõltuvad. Kui lüliti avada ajahetkel 0 ning süsteemi mahtuvus omab laengut  $U_C(0)$ , tekib mahtuvuspinge  $U_C$  võnkumine, tänu energiavahetusele induktiivsuse  $L$  ja mahtuvuse  $C$  vahel. Kui takistus  $R=0$ , siis jätkuks võnkumine lõputult, antud juhul on aga aktiivtakistus  $R$  väga väike, seetõttu hakkab  $U_C$  sumbuma ning jõuab lõpuks nulli. [4]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.9)$$



**Joonis 1.8. RLC ahel ja transient [4]**

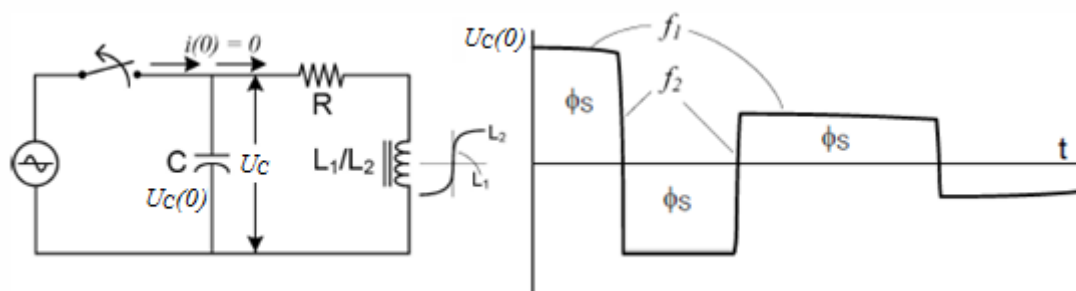
Kui nüüd võtta sama ahel, ainult omades mittelineaarset induktiivsust, tekib kaks olulist sagedust. Magneetimisinduktiivsuse sagedus  $f_1$  mitteküllastus piirkonnas ja õhksüdamiku induktiivsuse sagedus  $f_2$  küllastus piirkonnas. [4]

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C}} \quad (1.10)$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C}} \quad (1.11)$$

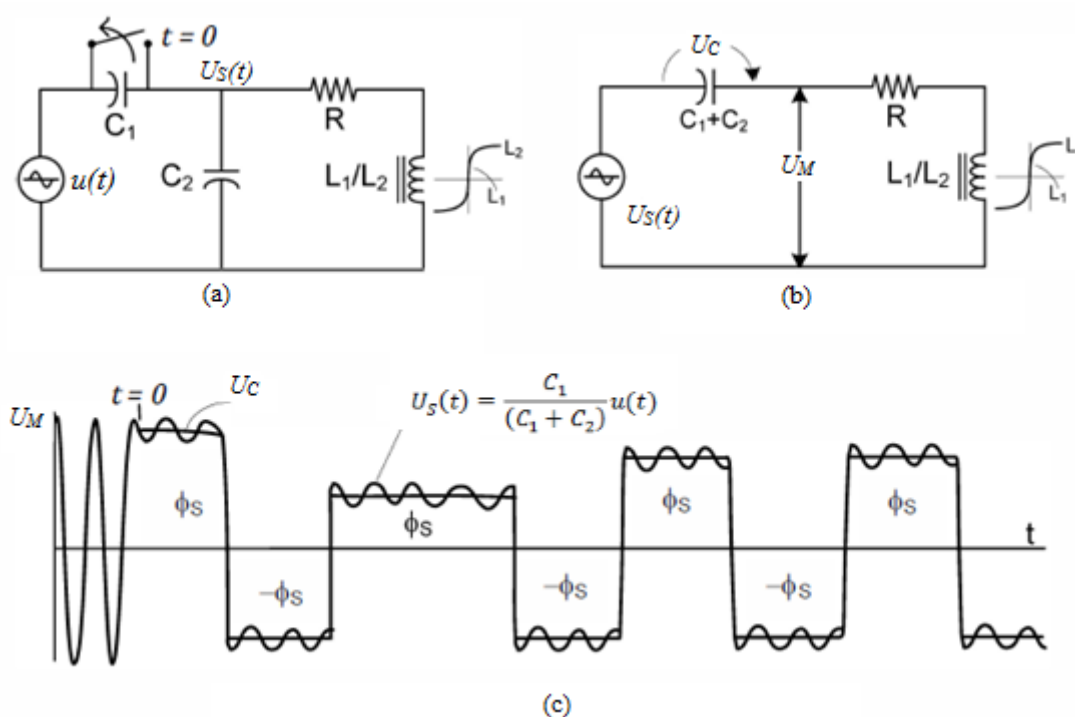
Joonisel (Joonis 1.9) on kujutatud RLC ahel küllastusinduktiivsusega. Kui lüliti avada ajahetkel 0, siis mahtuvuspinge  $U_C$  hakkab võnkuma sagedusel  $f_1$ . See suurus on väga väike, sõltudes mahtuvuse  $C$  suurusest ning on tavaliselt alla mõne Hz. Kasutades valemit (1.8), kus  $u(t) = \cos(2\pi f_1 t)$ , magnetvoog  $\phi$  suureneb, kuni saavutab taseme  $\phi_{Sat}$  ning tekib võnkumine sagedusel  $f_2$ , mis toimub märksa kõrgemal sagedusel. Sagedusel, mis on 50 või enam korda suurem kui  $f_1$ . Sellise võnkumise juures tuleb induktor küllastusest välja, omades mahtuvuspinget  $-U_C$  ning kogu protsess kordub. Mahtuvuspinge  $U_C$  suurus väheneb koos koormuskadudega, mis on tingitud aktiivtakistusest  $R$  võnkesageduse  $f_2$  ajal. Kui takistus  $R$

puuduks ning küllastus oleks sümmeetriline nii positiivses kui ka negatiivses suunas, siis võnkumine sellisel kujul võiks jätkuda lõpmatuseni. [4]



**Joonis 1.9. RLC ahel küllastusinduktiivsusega ja transient lainekuju [4]**

Illustreerides olukorda, kus võib tekkida püsiv võnkumine, lisatakse ahelasse, mis on kujutatud joonisel (Joonis 1.10a), mahtuvust  $C_1$ . Selle ahela aseseem koos võrdväärse pingega  $U_S(t)$  on kujutatud joonisel (Joonis 1.10b). [4]



**Joonis 1.10. RLC ahel mittelineaarse induktiivsuse ja pingega (a), RLC ahela ekvivalentne aseseem (b) ning transient ja ferresoantsoleku lainekuju (c) [4]**

Joonisel (Joonis 1.10b) kujutatud ahela pinge  $U_M = U_C + U_S(t)$ . Juhul, kui võrdväärne pinge  $U_S(t)$  suudab katta aktiivtakistusest  $R$  tingitud kaod, siis on võimalik tekitada püsiv seisund ehk talitus küllastunud olekus trafo karakteristikul, tuntud ka kui ferresoants. [4]

### 1.3.4. Ferroresonantsahela analüüs

Ferroresonantsahela analüüsimiseks kasutatakse erinevaid lähenemise viise. Hästi arusaadavad ning lihtsad analüüsid võrgusagedusel on faasoranalüüs, lineaarse ahela analüüs ning magnetkarakteristiku kaksikoleku analüüs.

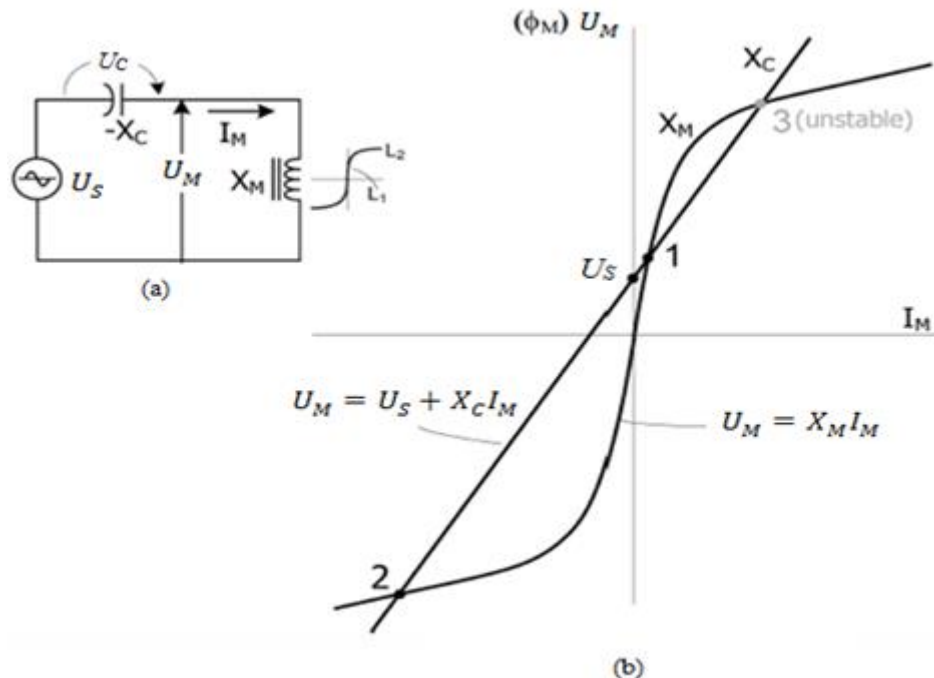
#### Faasoranalüüs

Trafo normaaltöö ning ferroresonantsoleku tööd põhisagedusel võib graafiliselt näidata ning analüüsida, kasutades faasoranalüüsi (*phasor analysis*). Faasoranalüüs on lihtne ning efektiivne võrguahela analüüs, kus ahela võib teisendada ühefaasiliseks ahelaks, kujutamaks ferroresonantsahelat küllaltki täpselt. [4]

Joonisel (Joonis 1.11a) on kujutatud ferroresonantsahel lihtsal kujul, kus  $X_C$  on põhisageduse mahtuvustakistus, mis on näidatud negatiivsena ja  $X_M$  on trafo mittelineaarse magnetkarakteristiku koguinduktants. Kasutades valemeid (1.12) ja (1.13) tekivad funktsioonid, mis on kujutatud joonisel (Joonis 1.11b). Joonisel on näha kolm tööpunkti. [4]

$$U_M = X_M I_M \quad (1.12)$$

$$U_M = U_S + X_C I_M \quad (1.13)$$

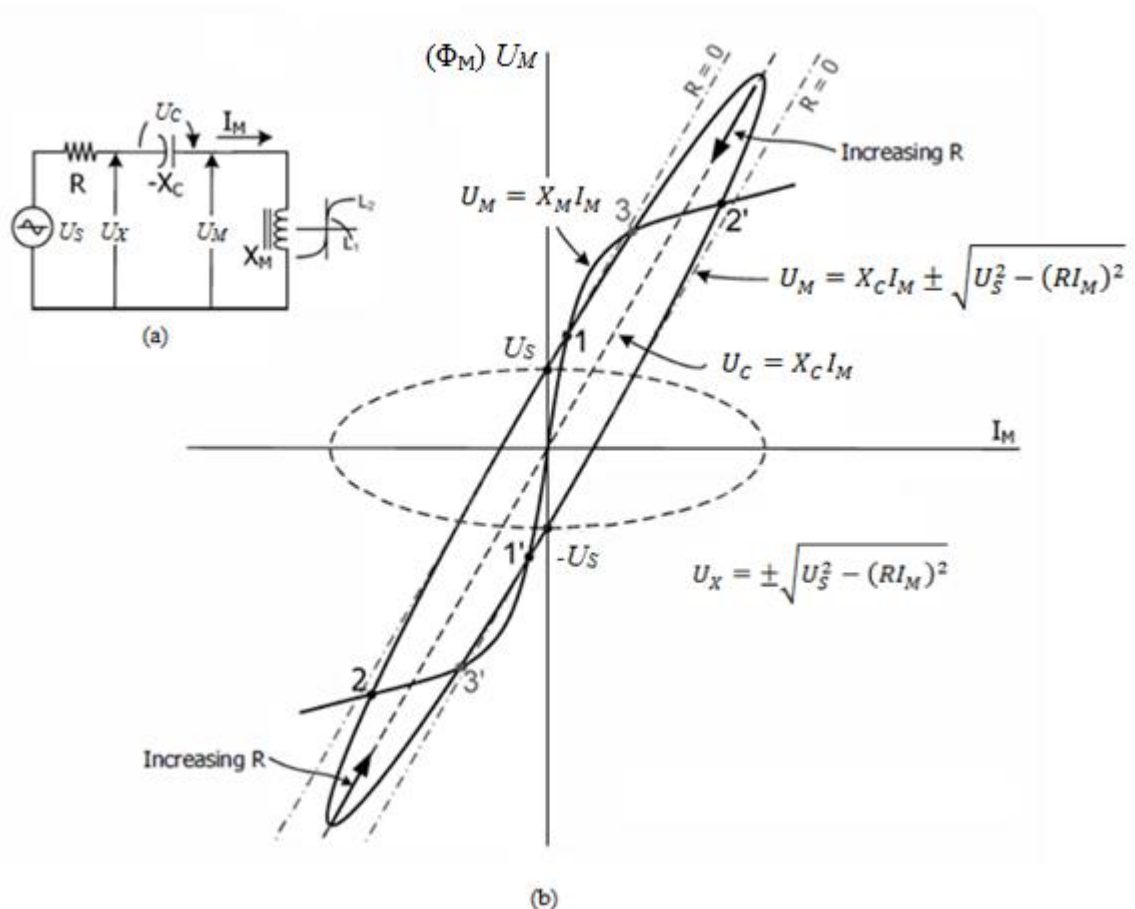


Joonis 1.11. Lihtne ferroresonantsahel (a) ja graafiline trafo tööpunktide lahendus (b) [4]

Punkt 1 on stabiilne normaaltalitlus, kus trafo töötab mitteküllastunud olekus. Punkt 2 on stabiilne ferresonantsolek, kus trafo töötab küllastunud olekus. Tööpunkt 3 on ebastabiilne ning seetõttu ei saa tekkida. Kui punktide 1 ja 2 puhul voolu ja pingemuutused käituvad vastastikku ning tõmbavad tööpunkti tagasi, siis punkti 3 vähimigi voolumuutus muudab ka pinge suurust, mis omakorda tekitab suuremat voolumuutust ning mille tagajärjel liigub tööpunkt eemale stabiilse punkti suunas. [4]

Joonisel (Joonis 1.12) on näidatud lahendus, kus arvesse on võetud aktiivtakistuse mõju. Kasutatakse valemeid (1.12) ja (1.14). [4]

$$U_M = X_C I_M \pm \sqrt{U_S^2 - (R I_M)^2} \quad (1.14)$$



**Joonis. 1.12. Ekvivalentne ahel aktiivtakistuse mõjuga (a) ja tööpunktide graafilise lahendus (b) [4]**

Valemi (1.14) funktsioon on ellips ning lisades joonisele (Joonis 1.12) valemi (1.12) tekib kuus tööpunkti, kus punktid 1, 2 ja 3 on positiivsed ning 1', 2' ja 3' on negatiivsed võrgupinge  $U_S$  suurused. Sarnaselt joonisega (Joonis 1.11) on punkt 1/1' stabiilne trafo tööpiirkond, punkt 2/2' on stabiilne ferresonantsolek ning punkt 3/3' on ebastabiilne ja ei saa tekkida. Ellipsi suurus on

seotud aktiivtakistusega  $R$  ning näitab võimalust väljumaks punktist 2 piisaval koormamisel ehk ellips laieneb takistuse vähenemisel. Kui  $R=0$ , tekiks joonisele (Joonis 1.12b) kaks sirget, mis on antud juhul märgitud kriipspunktjoontega. [4]

Faasoranalüüs on üks lihtsamaid ferreesonantsi analüüsi meetoditest, arusaamaks fenomeni põhitõdedest. Seda on kasutatud edukalt kohas, kus lihtsad ning täpsed ferreesonantsahelad aset võivad leida. Analüüsi raskendab mittelineaarsus ning samuti osaliselt küllastunud mitmemähiseliste trafo südamikute puhul, võib täpsel modelleerimisel tekkida palju tundmatuid suurusi, mis lubaksid uurida, mis täpselt juhtub ferreesonantsi olukorras. [5] Seetõttu eelistatakse keerukamaid analüüsivorme, kus keerulisemad mudelid nõuavad täpsemat modelleerimist ning spetsiaalse tarkvara nagu *ATP/EMTP (Alternative Transient Program / Electromagnetic Transients Program)* kasutamist. [4]

#### Lineaarse ahela põhiseduslik analüüs

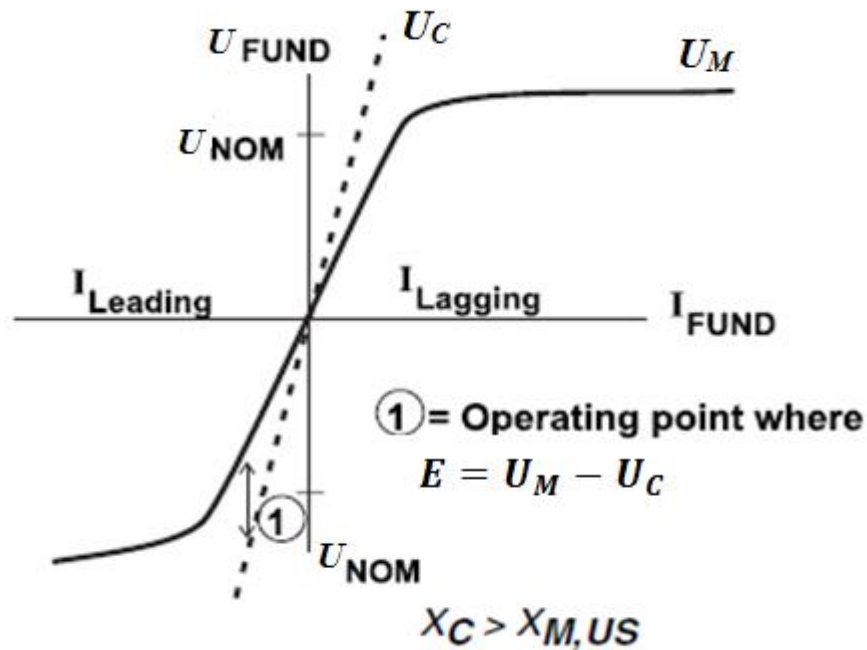
Lineaarse ahela analüüs (*linear circuit analysis*) on laialdaselt kasutatav analüüs ferreesonantsahela uurimisel. Analüüs keskendub maksimaalse mahtuvustakistuse  $X_C$  suuruse otsimisele, mis on lubatud antud trafo magnetkarakteristiku mittekuüllastuse  $X_{M,US}$  juures, mis piiraks mahtuvuspinget  $U_C$  mõnele kindlale maksimaalsele lubatud suurusele. Kuni trafo magnetkarakteristiku koguinduktants  $X_M$  jääb mittekuüllastuse  $X_{M,US}$  lineaarsesse piirkonda ja süsteemi takistuselemendid on väikese suurusega, on mahtuvuspinget  $U_C$  lihtne arvutada kasutades lineaarse ahela teooriat (*linear circuit theory*). Aluseks võetakse minimaalne  $X_C/X_M$  suhe, mis suuresti sõltub süsteemi ja trafo konfiguratsioonist. Näiteks *Ralph Hopkinsi* soovitusel minimaalseteks  $X_C/X_M$  suheteks on: [5]

- 40 Dyn-lülituses trafo puhul;
- 30 Dd-lülituses trafo puhul;
- 30 Yd-lülituses trafo puhul;
- 1 YNyn-lülituses trafo puhul.

Analüüside põhjal tehakse katseid päris trafodel või väiksemate mudelite koopiatel, mis ühendatakse erinevate mahtuvuste või liini pikkustega lahtistele faasidele. Tavaliselt ei näidata täpseid lainekujusid, vaid räägitakse saavutatud pingete tipu väärtustest. Lineaarse ahela analüüs on suur lihtsus väga keerulisest mittelineaarsest talitluse piirkonnast. Samuti on trafo disainid viimase paarikümne aasta jooksul oluliselt muutunud alates ajast, mil paljud testid tehtud on. Modernsed trafod on väiksemate kadude ning suurema mahtuvusega. [5]

Joonisel (Joonis 1.13) on mahtuvustakistus  $X_C$  suurem kui magnetkarakteristiku mittekuüllastus  $X_{M,US}$ . Sellisel juhul ei ole vahet, kui suur on pinge  $E$ , isegi, kui südamik läheb küllastusse, ei teki

talitluspunkti ergutusvoolule  $I_{EXC}$ , kus  $E = I(jX_M - jX_C)$ . See on ka harilik disain hoidmaks ära ferroresonantsi, kuid talitus selles piirkonnas ei hoiä ära pingetõusu ahelas, mis tekib kõigis LC võrkudes. Valides suure  $X_C$ , piiratakse voolu voogu ning sellega omakorda pingetõusu. [5]

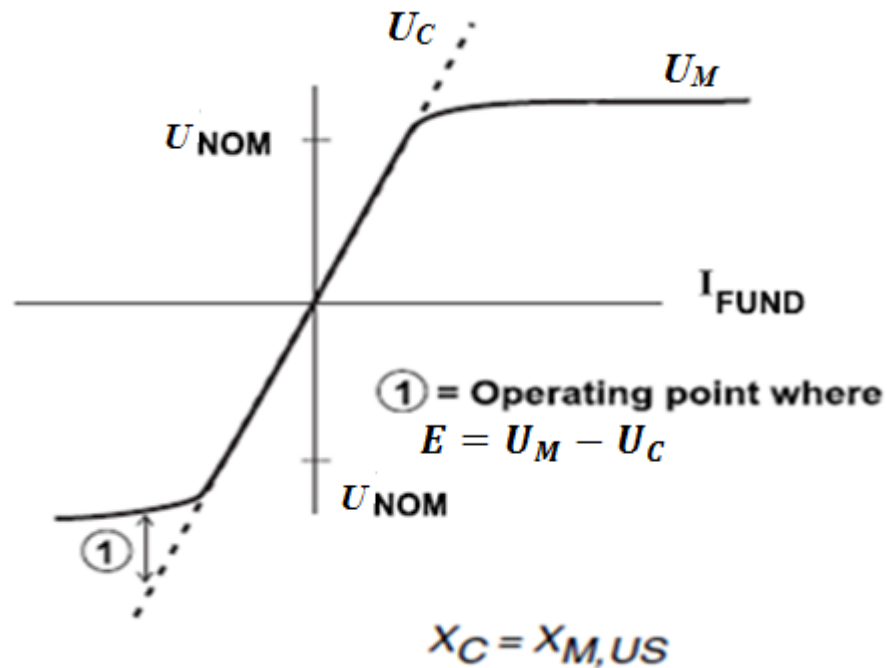


**Joonis 1.13. Magnetkarakteristik, kus mahtuvustakistus  $X_C$  on suurem mitteküllastusest  $X_{M,US}$  [5]**

Joonisel (Joonis 1.13) on vool  $I$ , kas pingest ees või maas  $90^\circ$  võrra ning selle nihke ohjamiseks vajaks takistuskomponent pingele ja voolule väga suurt vektorit. [5]

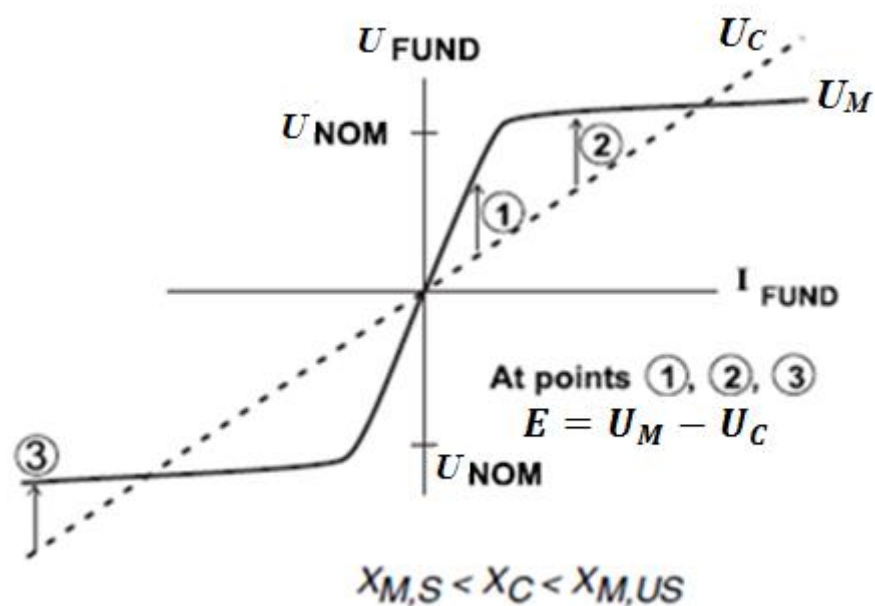
Joonisel (Joonis 1.14) on magnetkarakteristiku koguinduktants  $X_M$  ja mahtuvustakistus  $X_C$  peaaegu võrdsed. Et tõsta pinget väärtusele  $E = I(jX_M - jX_C)$ , tuleb kasutada voolu, mille puhul trafo läheneb küllastusele. Mahtuvustakistuse  $X_C$  pingele suhtes on tõusnud üle normaalsuuruse. Probleem on alanud, aga ferroresonants ise pole tekkinud. [5]





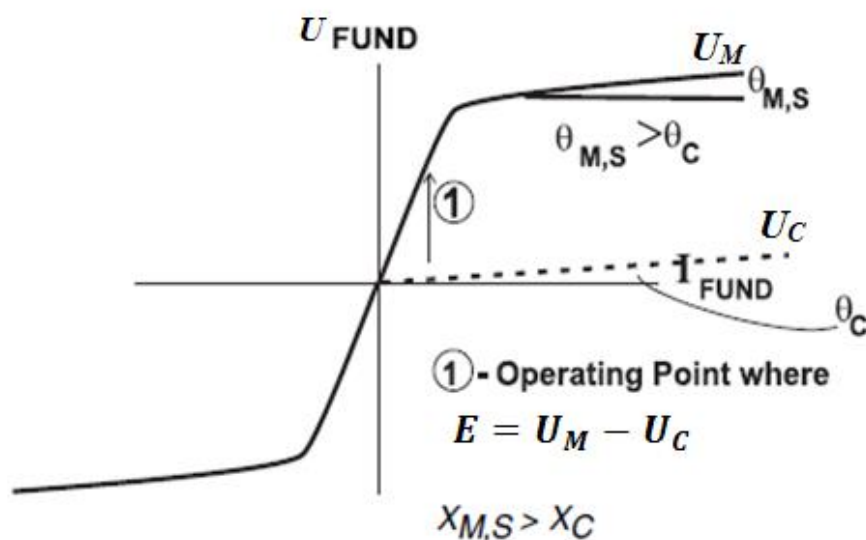
**Joonis 1.14. Magnetkarakteristik, kus mahtuvustakistus  $X_C$  on võrdne mitteküllastusega  $X_{M,US}$  [5]**

Joonisel (Joonis 1.15) hakkab ferreesonantsolek nähtavale ilmuma. Nüüd vastab suurusele  $E = I(jX_M - jX_C)$  kolm tööpunkti ning punkti 2 võib näha rohkem intuiitiivselt kui matemaatiliselt, kuna punkt 2 on ebastabiilne ehk kui  $E$  tõuseb, peab vool langema, et jõuda uue talitluspunktini. Seetõttu on punktid 1 ja 3 võimalikud stabiilsed punktid. Voolud punktides 1 ja 3 on üksteise suhtes nihkes  $180^\circ$  ning on ka erineva suurusega. Huvitav aspekt punkti 3 kohta, et kui olukord on alguse saanud, võib pinget  $E$  oluliselt vähendada, kuid resonantsolukord jääb alles. Kui pinge langeb, siis liigub punkt 3 paremale,  $U_C$  ja  $U_M$  kõverjoonte ristumisele lähemale, kuid ei liigu ristumiskohast edasi, isegi siis, kui  $E$  läheneb nullile, sest puuduvad takistust omavad elemendid. [5]



**Joonis 1.15. Magnetikarakteristik, kus mahtuvustakistus  $X_C$  on suurem küllastusest  $X_{M,S}$ , kuid väiksem mittekuüllastusest  $X_{M,US}$  [5]**

Viimane talitluspiirkond, millega arvestada, tekib, kui mahtuvustakistus  $X_C$  jätkab vähenemist, kuni impedantsi nurgad vastavad tingimustele  $\angle\theta_M > \angle\theta_C$ . Sellisel juhul on raske tösta mahtuvuspinget  $U_C$  ning kogu süsteemi pinge tuleb  $U_M$ -st. Seal puudub talitluspunkt, nagu on ka näidatud joonisel (Joonis 1.16). [5]



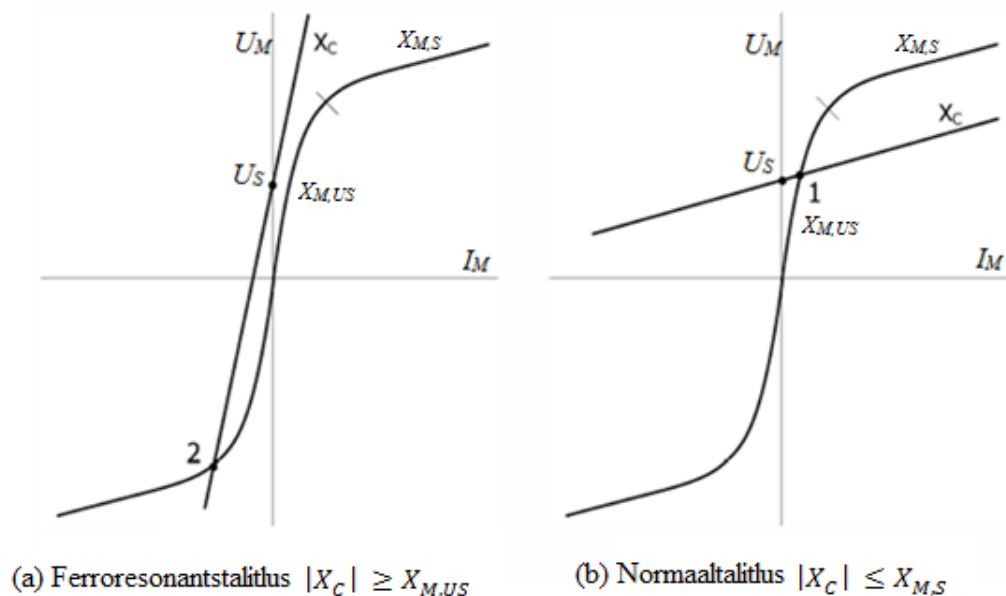
**Joonis 1.16. Magnetikarakteristik, kus mahtuvustakistus  $X_C$  on väiksem küllastusest  $X_{M,S}$  [5]**

### Magnetkarakteristiku kaksikoleku (*dual-state*) analüüs

Ferroresonants on paremini arusaadav, kui teda vaadata kui ahelat, mis võngub kahe seisundi vahel (kaks trafo magnetkarakteristiku koguidektantsi  $X_M$  suurus: küllastunud  $X_{M,S}$  ja mitte küllastunud  $X_{M,US}$ ), mitte ahelana, mis on üldistus küllastamata lineaarsest olekust ühe  $X_M$  suurusega. Seisundis 1 on kondensaator laetud ning omab elektrisüsteemi poolt määratud väärtust. Mitteküllastunud trafo magnetkarakteristiku impedants on piisavalt kõrge, et arvestada selle mõju pikimahtuvustele. Mingil ajahetkel küllastab kondensaator trafo ning aeg, mis selleks kulub, sõltub pingekõvera ala suurusest. Seisundis 2 on trafo küllastunud ja kondensaator tühjeneb ning laeb ennast uuesti täis vastaslaenguga, mille tulemusel trafo läheb tagasi seisundisse 1. [5]

#### 1.3.5. Ühe punkti töö

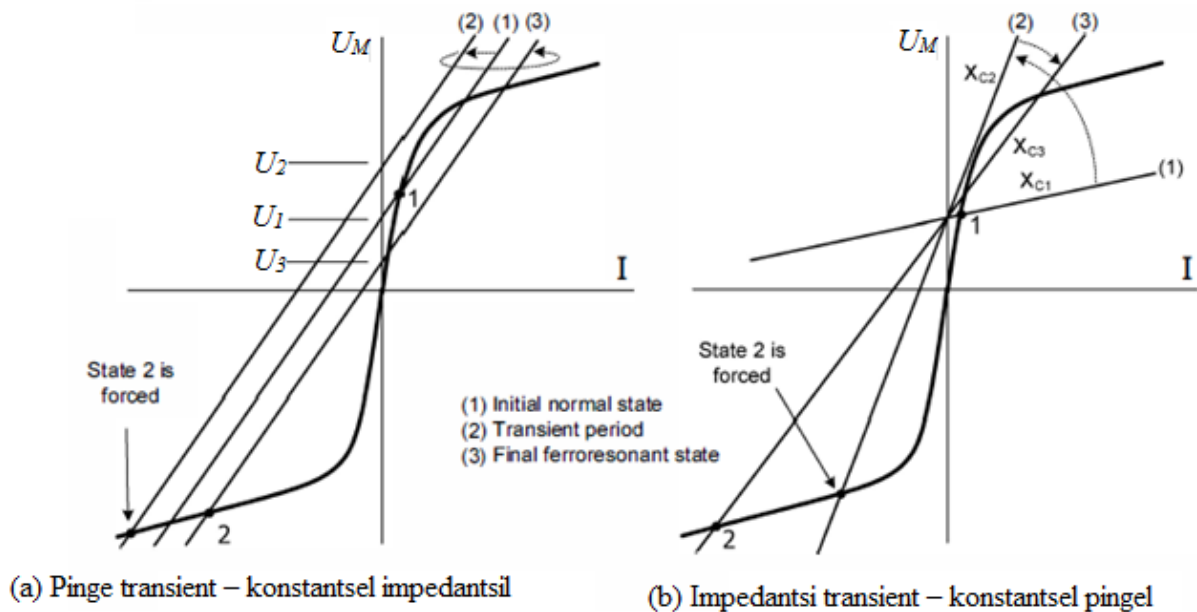
Joonisel (Joonis 1.17) on näidatud mõned võimalikud ühe punkti tööpiirkonnad, mis sõltuvad mahtuvustakistuse  $X_C$  suurusest trafo mittelineaarse magnetkarakteristiku koguidektantsi  $X_M$  suhtes. Joonisel (Joonis 1.17a), kus  $X_C$  suurus on võrdne või suurem, kui mitteküllastunud induktants  $X_{M,US}$ , tekib lahendus ainult punktile 2 ning trafo opereerib küllastunud ehk ferroresonants olekus. Joonisel (Joonis 1.17b) on  $X_C$  suurus võrdne või väiksem küllastunud induktantsist  $X_{M,S}$  ning tekib lahendus ainult punktile 1, kus puudub igasugune ferroresonantsi tekkevõimalus. [4]



**Joonis 1.17. Ferroresonantstaliitus (a) ja normaaltaliitus (b) [4]**

### 1.3.6. Tööpunktide muutmine transient olukorras

Trafo normaaltööpiirkond on magnetkarakteristikul mitteküllastunud piirkonnas ning ferroresonants tekib peale transienttalitlust nagu trafo pingestamine, ühe faasi lülitus, vea kõrvaldamine, kaitserike või maanduse kadu. Sõltumata muutustest transienti pingesuuruses, impedantsi parameetrites ja/või ahela konfiguratsioonis, sunnib talitus hüppama normaalpiirkonnast ferroresonantspiirkonda. Joonisel (Joonis 1.18) on näidatud keeruline dünaamiline protsess väga lihtsal kujul. Ferroresonantsolek on kindel olek, mis on püsiv, kui sellega midagi ette ei võeta. [4]



Joonis 1.18. Pinge tranisient (a) ja impedantsi transient (b) [4]

### 1.3.7. Ferroresonantsi kindlakstegemine ja tekkevõimalused elektrisüsteemides

Elektrisüsteemi disainides on tehtud palju muudatusi, mis suurendavad ferroresonantsi teket: [7]

- suurenenud maa-aluste kaablite kasutamine, mis suurendab süsteemi mahtuvust;
- suurenenud ülekandeliinide pinged;
- paranenud trafo materjalid ja disain, millel on väiksemad ergutusvoolud, kõrgemad magnetilised suurused ja kõrgemad mahtuvuste suurused;
- reaktiivkompenseerimine ülekandeliinides.

Ferroresonantsi sagedamini esinevad tunnused on suured püsiliigpinged, suured püsivoolud, pinge ja voolu siinuskuju suured moonutused, neutraali pingenihe, trafo kuumenemine tühijooksul, trafodes ja muudes mähistes esinev ebaharilik madal heli, elektriseadmete

(kondensaatorpatareide, pingetrafode jms) vigastused, voolutrafode primaarmähise purunemine samal ajal kui sekundaarmähis on vigastamata ning kaitseseadmete vale rakendumine. Ferroresonantsi aitab identifitseerida ka pinge ja voolu lainekuju võrdlus tüüpilise ferroresonantskõveratega. Diagnoosi keerukuse korral (vähe lähteandmeid, palju võimalikke tõlgendusi) tuleks analüüsida sündmuskoha võrgu konfiguratsiooni koos eelnevalt toimunud sündmustega (trafo pingestamine, koormuse väljalülitamine jms). Edasi tuleks kontrollida, kas esinesid järgmised kolm tunnust: [1]

- esinevad mahtuvused koos mittelineaarsete induktiivsustega;
- esineb kasvõi üks võimalus, kus pinge ei ole fikseeritud (isoleeritud neutraal, ühe sulavkaitsme läbipõlemine, ühefaasiline lülitamine jms);
- võrgus esinevad vähekoormatud elemendid (koormamata jõu- või pingetrafod, väikese lühisvõimsusega toiteallikad).

Kui ükski nendest tunnustest ei esine, on ferroresonants vähetõenäoline.

Ferroresonantsi tekkimiseks peab ahel sisaldama mittelineaarset induktiivsust. Mittelineaarne induktiivsus tekib mähise ferromagnetilisest materjalist südamiku küllastumisel. Sellised mähised esinevad näiteks trafodel, generaatoritel, mootoritel, küllastusreaktoritel ja elektromagnetilistel pingetrafodel. Elektrisüsteemides on kõige tavalisemateks ferroresonantsi põhjustajateks faasi ja maa vahele ühendatud pingetrafod, keskpinge võrkudes harva ka pingetrafod faaside vahel. Analüüs näitab, et kõige ohtlikumad on sellised elektrivõrgu skeemid, kus pingetrafodega on ühendatud mitte eriti suured võrgu mahtuvused, näiteks lühemad tühijooksus liinid, ülikõrgepinge-alajaamades (330 kV ja enam) koormamata kogumislatid jms. Enamikel juhtudel on ferroresonantsi tekkimiseks vajalik lühiajaline pinge suurenemine ehk pingehüpe. Suurimad võimalused resonantsi tekkeks esinevad võrgu ebasümmeetria puhul. [1]

Võimalikud ferroresonantsi juhtumid: [1]

- pingetrafot toidetakse läbi avanenud kontaktidega võimsuslüliti pingeühtlustuskondensaatorite;
- trafot toidetakse avariiliselt ühe või kahe faasi kaudu;
- pikikondensaatorit sisaldava liiniga ühendatud trafo;
- isoleeritud neutraaliga võrku toitev trafo;
- mahtuvuslikud pingetrafod induktiivses ahelas;
- pingestamata liiniga ühendatud trafo, kui liin paikneb paralleelselt ühe või mitme pingestatud liiniga;
- kaabliga või pika õhuliiniga toidatav trafo väikese lühisvõimsuse korral.

### 1.3.8. Ferroresonantsiga kaasnevad probleemid

Ferroresonantsiga kaasnevad probleemid: [8]

- püsivad faasidevahelised ning faasi ja maa vahelised liigpinged;
- püsivad liigvoolud;
- püsivad pinge ja voolu lainekuju moonutused;
- elektriseadmete rikked (soojuslikud või isolatsiooni rikke tõttu);
- kaitseparaatide kaitsevõime kadu;
- trafo metalloosade seinte ja sisemiste osade ülekuumenemine tänu dispersioonivoogudele ja südamiküllastusele;
- liigpingepiirike kahjustus, kaitseparaatide rike ülekuumenemise tõttu;
- trafo eluea lühenemine tänu dielektrilisele stressile ja ülekuumenemisele.

Katsetel on täheldatud Dy-lülituses olevates trafodes ning teistes maandamata jõutrafodes, mis saavad toidet maandatud allikast, pingetõusu 2 suhtühiku suuruseni hüpatas aeg-ajalt 4-5 suhtühiku suuruseni. Rääkides aga laialdaselt kasutatavast viie sambaga YNyn-lülitusega trafost, on ferroresonants endiselt võimalik, kuid tekkivad tipupinged on palju väiksemad, jäädes vahemikku 1-1,5 suhtühiku suuruseni, hüpatas harva 2 suhtühiku suuruseni. Samuti suudavad liigpingepiirikud sellise lainekujuga energiat neelata ning summutada ferroresonantsi, ilma, et tekiks suur kahju. Vooluhüpped, mis on seotud ferroresonantsiga ei ole väga suured, kõikides vahemikus 1-20% trafo klassist. Enamus läbiviidavatest katsetest ei salvesta vooluhüppeid, nii et voolud võivad olla veelgi kõrgemad. [5]

#### Kaitserелеed

Kaitserелеed ei ole elektrisüsteemis tavaliselt paigutatud punkti, kus nad suudaksid tuvastada ferroresonantsiolukorra. Relee on tavaliselt disainitud juhtima lüliti nii, et ühefaasiline lülitus, mida seostatakse ferroresonantsiga, suure tõenäosusega aset ei leia. Samas võib tekkida olukord, kus relee näeb ferroresonantsi, näiteks relee võib tunda ferroresonantsi pingetrafol, mida ta kasutab ahela jälgimiseks. Probleem on ka selles, et kaitserелеed töötavad põhisagedusel, aga ferroresonants omab häiritud lainekuju, millel võivad tekkida suured tipud, seepärast on tavalisel kaitserелеel raske ferroresonantsi tunnetada. Üheks lahenduseks võib lasta releel lülitada, kui ta korduvalt tunneb üksikuid pingehüppeid. [5]

#### Ülekuumenemine

Püsivalt kestev ferroresonants, võib põhjustada seadmete sisemiste ühenduste ülekuumenemist ning isolatsioonirikkeid. On palju vaidlusi, kas ferroresonants põhjustab ülekuumenemist.

Mõned teadlased väidavad, et on jätnud trafo ferresonantsolekusse tundideks, ilma, et temperatuur tõuseks, mis muidugi sõltub uuritud ferresonantsi mudelist ja olekust. Mõni olek ei vii südamikku sügavasse küllastusse. Kui kõrgepingeseadmeid saadab ferresonants, võib tekkida kahju nii primaar- kui sekundaarahelatele. Liigpingepiirikud on sagedased ohvid. Liigpingepiirikud on küll võimelised vastu võtma mõningaid liigpingeid, kuid on piiratud energia neelamise võimega, mistõttu võivad nad rikneda üsna ruttu. [9]

### Liigpingepiirikud

Liigpingepiirikutel on oht saada kahjustada ferresonantsi tõttu. Pingehüpped ja sellega seotud energia võib olla liiga kõrge, et seda usaldusväärset neelata. Rikked on tihti katastroofilised ning lõppenud liigpingepiiriku lõhkemisega. Samas, viie sambaga maandatud tähtlülituses olevates trafodes, ei ole pingetipud niivõrd kõrged ning piisava energianeelamise võimega liigpingepiirikud võivad edukalt summutada ferresonantsi. [5] Kuna pingepiirikud on saanud tavaliseks arvutites, kontori ja tööstuse seadmetes, on nad kliendi poolel suurimas ohus ferresonantsi tekkel. [9]

### Maandatud täht-avatud kolmnurk trafo maalühise tunnetamine

Klassikaline meetod maalühise äratundmiseks maandamata süsteemides on maandatud täht-avatud kolmnurk lülituses pingetrafo, millel tuleb jälgida avatud kolmnurga pinget, mis on  $3U_0$ . Pingetrafo sellises rakenduses omab ferresonantsiks vajalikke elemente. Kui selliseid trafosid otsustatakse sellegipoolest kasutada, tuleks arvutuste tegemisel arvestada liini pingega, mis tekib maalühise ajal. Pingetrafo oma loomult töötab normaaltalitusel madalal magnetvootihedusel. Tüüpiline on selliste pingetrafo puhul omada takistit avatud kolmnurgas, et summutada ferresonantsi. Avatud kolmnurga lähenemine oletab, et ferresonants tekitab nulljärgnevuspinget. [5]

### Hajatootmise probleemid

Taastuvenergia allikate jaoks, mis on ühendatud võrku läbi konverterite, on vajalik kasutada kondensaatoreid vahelduvvoolu poolel. Lisaks on vaja kondensaatoreid reaktiivenergia kompenseerimiseks mõnedel tuuleturbiinidel. Selliste rajatiste paigaldamisel suureneb ferresonantsi tõenäosus võrreldes võrguga ilma nende mahtuvusteta. Samuti võib tekkida ferresonants saartalitusel, kus trafo koormus on väike või puudub üldse. Induktsioon- ja sünkroongeneraatorid on alati ferresonantsile. Ferresonants ja liigpinge suurus sõltub süsteemi mahtuvuse suurusest ja generaatori koormusest ning võib ulatuda 3-4 suhtühiku suuruseni. [10] [11]

### Trafo kahjustus

Trafo kahjustust on seotud ferresonantsiga, aga seda rohkem isolatsioonikahjustuse näol, mitte südamikü ülekuumenemise näol. Kui saavutatud pinge ei kahjusta isolatsiooni, siis kohene trafo vigastus on vähetõenäoline. Seotud voolud on küllaltki madalad. Trafo on viidud sügavalt küllastusse, nii et pöörivoolu kaod ja hüstereesi kaod on suured. Ferresonants leiab aset pingestamata trafodel ning vajalik voolutugevus ferresonantsi tekkeks ei ole suur, seepärast ka kuumenemise efekt trafodele on madal. On täheldatud ferresonantsi kestvust tundide viisi, ilma, et trafo oleks ülekuumenenud. [5]

### Vähenenud eluiga

Trafod suudavad tavaliselt vastu pidada ferresonantsist tingitud liigpingetele. Kaabel on samuti vähe ohustatud, väljaarvatud juhul, kui isolatsiooni taluvus on vähenenud aastate või füüsilise kahjustuse näol. Lastes aga süsteemielementidel töötada püsivalt üle normaaltaseme, võib oodata nende elementide eluea lühenemist. [9]



## 2. Ferroresonants elektrisüsteemides

### 2.1. Ferroresonantsiga võitlemine

#### 2.1.1. Ferroresonantsi ajalugu

Uurimustöid ferroresonantsist trafodes on tehtud alates aastast 1920, kui sõna ferroresonants jõudis kirjandusse. [12] Kuigi trafodes esinevatest resonantsidest oli juttu juba aastal 1907. [13] Praktiline huvi tekkis 1930-ndatel, kui näidati, et jadakondensaatorite kasutamine pingereguleerimisel põhjustas jaotusvõrgus ferroresonantsi, põhjustades liigpingekahjustusi. [14] Esimese analüütilise töö viis läbi *Rudenberg* 1940-ndatel. [15] Veel detailsema ja vaevanõudvama töö viis läbi *Hayashi* 1950-ndatel. [16] Hilisemad uurimused on jaotunud kahte põhilisse leeri: trafo mudelite täiustamine ning ferroresonantsi uurimine elektrisüsteemi tasandil. [17]

Ferroresonantsiga tegelemise eelduseks on trafo südamikku kirjeldavate mittelineaarsete parameetrite mõistmine. *Swift* [18] ja *Jiles* [19] on andnud arusaamise trafo südamiku käitumisest ja pöörisvoolude kadudest. *Frame* [20] ja teised on välja arendanud lineaarse meetodi mittelineaarsuste modelleerimiseks küllastatavates induktiivsustes. *Hopkins* [21] tegi katsetusi ja simulatsioone süsteemis, kasutades erinevaid lülitustaktikaid ferroresonantsi esilekutsumiseks kolmefaasilises süsteemis. *Smith* [22] kategoriseeris erinevad ferroresonantsi tüübid ühes kindlas kolmefaasilises trafos, tuginedes pinge lainekujude suurustele ja ilmutumisele. *Arturi* [23] ja *Mork* [24] demonstreerisid kahesuse muutuste (*duality transformations*) kasutamist, et säilitada trafo ekvivalentne ahel. *Kieny* [25] ja *Mork* [26] on näidanud, et mittelineaarse dünaamika ja kaootilise süsteemi teooriaid ning eksperimentaalseid tehnikaid võib kasutada, et paremini aru saada ferroresonantsist ja mittelineaarse süsteemi modelleerimise piirangutest.

#### 2.1.2. Ferroresonantsi ärahoidmine

Kõige levinum soovitus ferroresonantsi ärahoidmiseks on alati lülitada trafosid kasutades kolmefaasilisi seadmeid, et vältida jadamisi induktiiv/mahtuvuslikke ahelaid. Samuti soovitatakse pingestada trafosid kasutades lüliteid, mis asuvad kohe nende kõrval. Kui trafo on pingestatud läbi maandamata trafomähise (kolmnurk, maandamata täht, avatud kolmnurk), tuleb erilist tähelepanu pöörata ferroresonantsi ennetamise tehnikate kasutamisele, sest sellised mähised omavad suurt võimalust jada LC võrgu loomiseks. Kui ahela peab trafolt sisse lülitama ühe faasi kaupa, tuleb avatud faasi mahtuvust piirata, mis tähendab, et piirata tuleb liini pikkust.

Samuti, kui ahel on vaja sisse lülitada ühe faasi kaupa ning on soodumus jada LC võrgu tekkimiseks, peab trafo sekundaarpoolel või paralleelselt mahtuvusega olema koormust, et summutada resonantsahel. Koormus sekundaarpoolel peab olema vaid mõni % nominaalkoormusest, et blokeerida ferroresonants. Ühe võimalusena võib osta trafo, mis on madala magnetvootihedusega, mistõttu on seda raskem ferroresonantsolekusse viia, kuid sellised südamikud on suuremad ning omavad suuremaid rauas kadusid. [5]

#### Meetmeid ferroresonantsi vältimiseks: [9]

- pikendades neutraali ja ühendades kõik trafo primaarahelad faasi ja maa vahele, et luua maandatud täht või avatud täht konfiguratsioon kolmefaasi töös;
- sekundaarmähise takistused kuni 4 % trafo nimisuurusest, et vähendada transientpinge suurusi ja tõenäosust stabiilsete liigpingete saavutamiseks;
- kadude suurendamine ferroresonantsi ajal, ilma, et nad mõjutaksid normaaltalitlust. Näiteks tähtühenduses oleva mähise maandamine läbi takisti või sulgeda kolmnurkühenduses olevad mähised läbi takisti. Sobib kolme mitte nelja juhtme süsteemile;
- ferroresonants kaob mõnedel juhtudel kui sulgeda maanduslülitid. See on aeglane lahendus ning samuti peab lülitid mingi aeg uuesti avama, mis võib viia tagasi ferroresonants võnkumiseni.

#### Meetmeid jõutrafode puhul:

- üks võimalus on trafo lahti ühendada fiidrist või välja lülitada paralleelselt jooksev ahel, mis võib olla ergutuse allikaks ning toita ferroresonantsi; [27]
- tänu ferroresonantsi stohhastilisele iseloomule võib alternatiivina liigpingepiirikute olemasolul, ahelat pingestada ning seejärel uuesti välja lülitada; [27]
- vähendada mahtuvust alla ohtliku taseme, vahemikus lülitist kuni trafoni (tuua lüliti trafole lähemale, sisselülitamist mitte teha enne, kui kõikides faasides on pinge täielikult taastunud); [1]
- mitte hoida trafot (näiv)koormusel alla 10%; [1]
- vältida tühijooksul pingestamist; [1]
- vältida ühefaasilist lülitamist; [1]
- vältida kaitsmist sularitega; [1]
- keelata pingelused tööd pika kaabliga ühendatud trafo korral; [1]
- vältida alajaama neutraali maandamist läbi takisti; [1]
- tähtühenduse korral, kasutada neutraali jäikmaandust. [1]

### Meetmed pingetrafo korrall:

- tuleb vältida pingetrafo ühendust isoleeritud lati sektsiooniga ehk väikese mahtuvusega; [27]
- kasutada küllastusreaktorit või lülitit pingetrafo sekundaarahelas, mis lülitub sisse, kui ferresonants tekib; [27]
- isoleeritud neutraaliga võrgus tuleb vältida primaarmähiste lülitamist maandatud tähte (kasutada, kas maandamata tähtühendust või kolmnurkühendust); [1]
- kui maandatud tähtühendust on tarvis nulljärgnevuspingete mõõtmiseks, siis kasutada madalat induksioonitaset (0,4...0,7 T, et nimipinge oleks küllastuspingest 2 korda madalam); [1]
- ferresonantsi summutamiseks kasutada piisavalt väikese takistusega summutustakisteid (kaotamata seejuures nõutavat täpsust). [1]

On oluline juba disainimise faasis vastu võtta meetmeid, vältimaks ferresonantsi. Hoolika süsteemi disaini puhul või pingetrafo paigutuse puhul, on võimalik suurendada faasi ja maa vahelist mahtuvust, vähendades seeläbi tõenäosust pingetrafo sattumist ferresonantsi. Pingetrafo, mis on otse elektriliselt ühendatud jõutrafodega ei lähe resonantsi. [27]

### Meetmed resonantsmaandatud võrgus: [1]

- kasutada ülekompanseerimist;
- Peterseni pooli juures kasutada summutavat aktiivtakistit;
- kaabelühenduses trafo puhul mitte lubada koormust alla 10% nimivõimsusest.

### **2.1.3. Ferresonantsi leevendamine**

Ferresonants on ohtlik, kuna võivad tekkida seadmeid ohustavad liigpinged, liigvoolud ja lainekuju moonutused, mis omakorda põhjustavad seadmetele ohtlikke temperatuuritõuse ja isolatsiooni kahjustusi. Ferresonantsi mõju vähendamise põhimõtted:

- vältida ferresonantsi soodustavaid projektilahendusi, lülitusoperatsioone, võrgu konfiguratsiooni; [1]
- veenduda, et võrgu parameetrite väärtused ei satuks (ka lühiajaliselt) ferresonantsi ohupiirkonda; [1]
- veenduda, et ferresonantsi summutamiseks oleks piisavalt aktiivkadusid; [1]
- vähendada süsteemi mahtuvust, eelistades õhuline kaablile; [28]
- vähendada trafo mittelineaarset reaktiivtakistust, disainides trafosid töötamaks lineaarsel poolel; [28]

- vältida trafo tööd koormamata olekus ehk vajadusel ühendada lahti primaarpoolelt. [28]

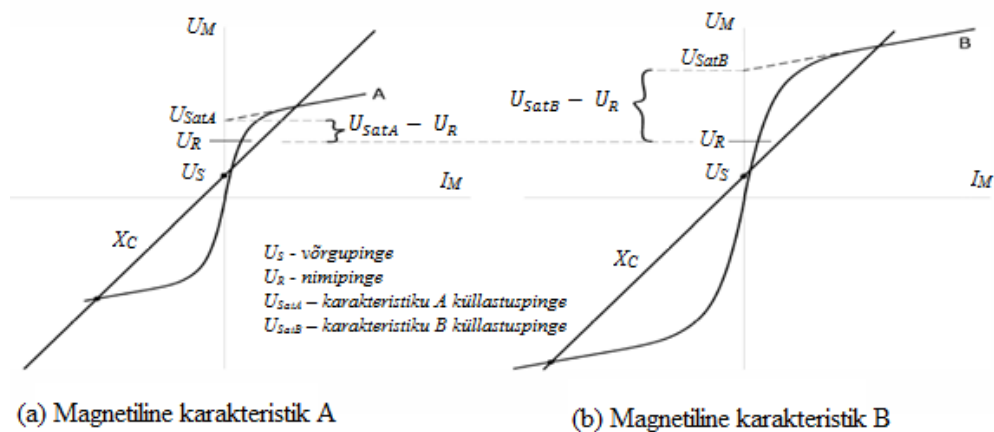
Tuleb tähele panna, et vastavalt isolatsiooni koordineerimise meetoditele ei arvestata tavaliselt pingepiirikute valikul ferresonantsi liigpingetega ja liigpingepiirikud seadmeid ferresonantsi liigpingete eest ei kaitse. [1]

### Pinge ebastabiilsuse parandamine

Pinge ebastabiilsuse võib parandada muutes talitusprotseduure või kasutades kaitseraleesid nii, et ferresonantsiolek ei saaks tekkida. Näiteks, võib ühe faasi lülitamise kolme faasilises süsteemis, muuta kolme faasiliseks lülituseks või kasutada pingereleid, mis on mõeldud mõõtma nulljärgnevuspinget ning vajadusel andma signaali kaitselülitile. On palju erinevaid võimalusi, kus ebastabiilsust on võimatu vältida ning kasutama peab teisi meetodeid. [4]

### Trafo magnetilise disaini muutmine

Trafo südamiku disaini uuendused on loonud võimaluse toota trafosid töötama kõrgema magnetvootiheduse tasemel, jättes seejuures ergutusvoolud ja rauas kaod vastuvõetavale tasemele. See lubab nimipinget  $U_R$  hoida küllastuspingele  $U_{Sat}$  lähemal nii, et  $U_{Sat}/U_R$  suhe on väike. [4]



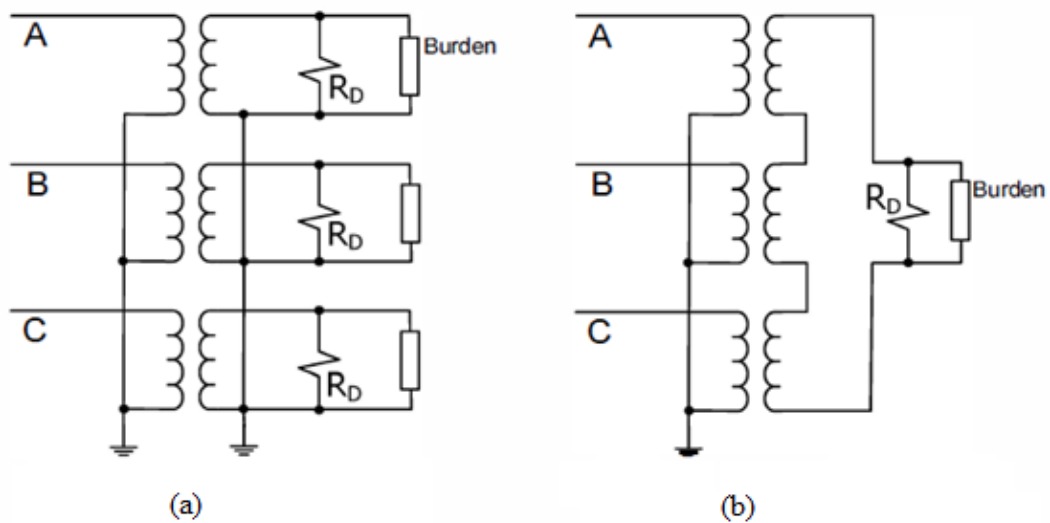
**Joonis 2.1. Magnetilised karakteristikud erinevate  $U_{SatA}/U_R$  suhetega [4]**

Joonisel (Joonis 2.1) on näidatud kaks erinevat magnetkarakteristikut. Karakteristiku A puhul  $U_{SatA}/U_R$  suhe on 1,38 ning karakteristiku B puhul  $U_{SatB}/U_R$  suhe on 2,17. Võrreldes karakteristikuid omavahel, võib näha, et karakteristiku B puhul on tarvis palju kõrgemat pingetransienti, et tekitada ferresonantsiolek, seda võib näha ka jooniselt (Joonis 1.18a). Samuti, vajab karakteristik B vähem summutamist ( $R_{max}$  on suurem), et ferresonants

kõrvaldada. Trafo magnetkarakteristiku modifikatsioon, ei pruugi alati rahalises mõttes olla praktiline lahendus, eriti kolmefaasiliste trafode puhul. Sellele tuleks mõelda väga kriitilistes kohtades. Samuti tasuks uurida erinevate tootjate magnetkarakteristikuid. [4]

### Summutustakisti lisamine

Levinud ferresoantsi kõrvaldamise viis on summutustakisti lisamine maandatud täht- või avatud kolmnurklülituses olevale trafo sekundaarmähisele, nagu on näidatud joonisel (Joonis 2.2). See kehtib nii jõu- kui ka mõõtetrafode puhul. Summutustakisti on tavaliselt osa ferresoantsi summutamise seadmetest. [4]



**Joonis 2.2. Summutustakisti maandatud tähe sekundaarmähisel (a) ja avatud kolmnurga sekundaarmähisel (b) [4]**

#### **2.1.4. Ferroresonantsi summutamine**

Kirjanduses räägitakse erinevatest ferresoantsi leevendamise võimalustest kõrgepingealajaamades. Sisselülitatavad takistid, mis on ühendatud tähtlülituses olevale trafo sekundaarmähisele. [29] Summutustakistid, mis on püsivalt ühendatud trafo avatud kolmnurga mähisega. [30] Õhksüdamikureaktori ühendamine paralleelselt kõrgepinge mähisega. [31] Jadakombinatsioon takistitest ja küllastusreaktorist sekundaarmähisel. [32] Induktiivse pingetrafo väljavahetamine mahtuvusliku pingetrafo vastu. [31] Kontrollitud lülitamise protseduur. [31] Maanduslüli sisselülitamine peale ferresoantsi tuvastust. [33] Kõrgema küllastusastmega pingetrafo kasutamine või neutraalitakisti paigaldamine. [3]

Joonis (Joonis 1.12b) näitab, et koormuse suurendamine, kõrvaldab ahela töö ferresoantsiolekus. Koormust on vaja lisada paralleelselt trafo magnetilise reaktantsiga, kuna

on ebapraktiline lisada koormust jadamisi, ilma süsteemi tööd mõjutamata. Joonis (Joonis 2.3a) näitab ferreesonantsahelat paralleelse takistusega ning Joonis (Joonis 2.3b) näitab faasi vektordiagrammi antud ahelale, millest tekib valemi (2.1) võrrand. [4]

$$U_M^2 \left[ \left( \frac{X_C}{R} \right)^2 + 1 \right] - 2X_C I_M U_M + X_C^2 I_M^2 - U_S^2 = 0 \quad (2.1)$$

Valemi (2.1) võrrand on ellips ning lisades joonisele (Joonis 2.3c) koos valemiga (1.12) tekivad joonisele (Joonis 2.3c) normaaltöö ning ferreesonants oleku tööpunktid. Kui aktiivtakistust  $R$  suurendada lõpmatuseni siis valem (2.1) teisendub valemiks (1.14). Aktiivtakistuse  $R$  vähendamisel, lisades piisavalt koormust paralleelselt, ellips kahaneb ning muudab kallet, mis näitab võimalust kõrvaldada ferreesonants punktis 2. Punktid 2' ja 3 saab analüütiliselt tuletada, kasutades sirge joone ühtlustamist, koguinduktantsi küllastunud piirkonna  $X_{M,S}$  kõverjoontel nagu on näidatud joonisel (Joonis 2.4). [4]

$$U_M = X_{M,S} I_M + U_{Sat} \quad (2.2)$$

Lisades valemi (2.2), valemile (2.1) ning mõistes, et mahtuvustakistuse  $X_C$  kalle on suurem küllastunud induktantsi  $X_{M,S}$  kaldest punktide 2' ja 3 suhtes, saame luua valemi (2.3). [4]

$$U_M^2 \left[ \left( \frac{X_C}{R} \right)^2 + \left( \frac{X_C - X_{M,S}}{X_{M,S}} \right)^2 \right] + U_M \left[ -2U_{Sat} \frac{X_C}{X_{M,S}} \left( \frac{X_C - X_{M,S}}{X_{M,S}} \right) \right] + \left( \frac{X_C U_{Sat}}{X_{M,S}} \right)^2 - U_S^2 = 0 \quad (2.3)$$

Pinge  $U_M$  lahenduse saab tuletada valemist (2.3) kasutades valemit (2.4). [4]

$$U_M = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (2.4)$$

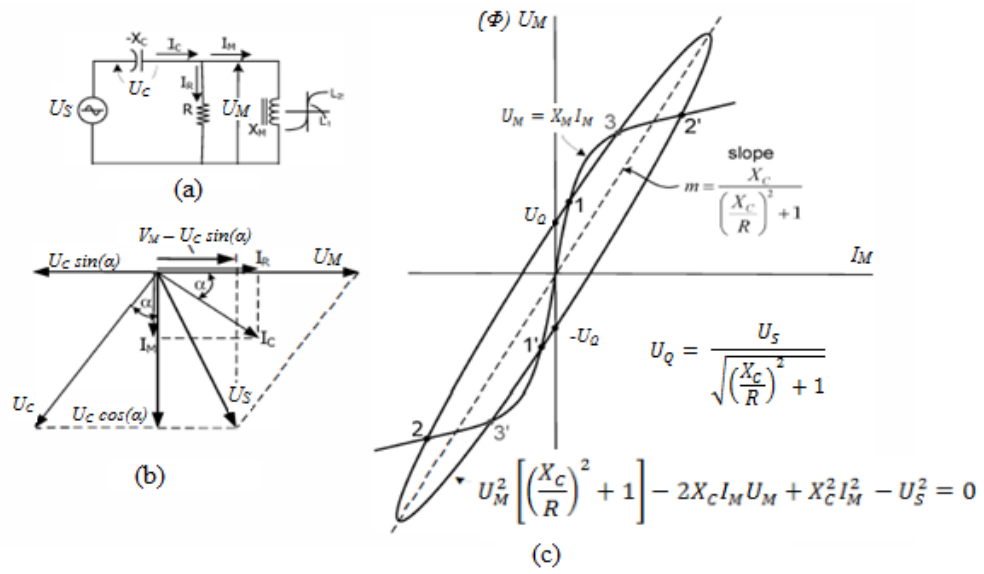
kus

$$a = \left( \frac{X_C}{R} \right)^2 + \left( \frac{X_C - X_{M,S}}{X_{M,S}} \right)^2 \quad (2.5)$$

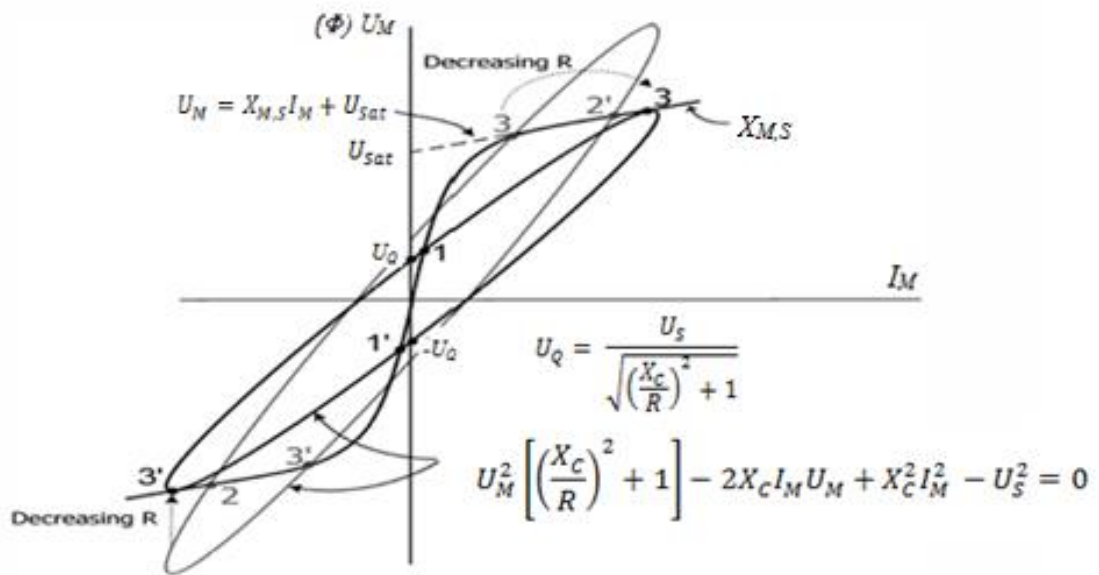
$$b = -2U_{Sat} \frac{X_C}{X_{M,S}} \left( \frac{X_C - X_{M,S}}{X_{M,S}} \right) \quad (2.6)$$

$$c = \left( \frac{X_C U_{Sat}}{X_{M,S}} \right)^2 - U_S^2 \quad (2.7)$$

Maksimaalse aktiivtakistuse suuruse  $R_{max}$  on võimalik kindlaks teha, vähendades graafiliselt ellipsit seni, kuni alles on vaid üks lahendus valemile (2.2), mis kujutab küllastunud poolt. See lahendus on ka ebastabiilse punkti 3 lahendus, kus tööpiirkonda ei teki, sundides teda liikuma punkti 1 ehk normaalsesse tööpiirkonda. Analüütiliselt, ühe punkti lahendus saab tekkida vaid siis, kui valemi (2.4) ruutjuurealune avaldis võrdub nulliga. [4]



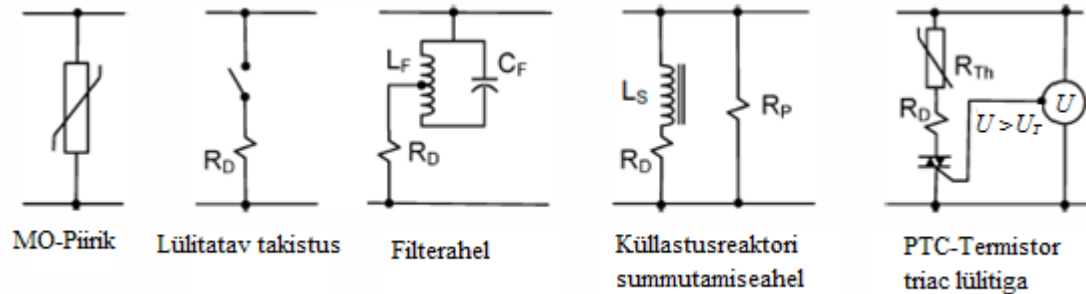
Joonis 2.3. Ferroresonantsahel paralleelse takistusega (a), ahela vektordiagramm (b) ja graafiline lahendus (c) [4]



Joonis 2.4. Punktide 2` ja 3` tuletamine [4]

## 2.2. Ferroresonantsi summutamiseahelad

Ferroresonantsi summutamiseks kasutatakse rida erinevaid seadmeid. Joonisel (Joonis 2.5) on näidatud mõned erinevad seadmed, mida kasutatakse ferroresonantsi summutamiseks. Iga seade pole täielik lahendus, aga aitab oluliselt teistel lähenemistel. [4]



Joonis 2.5. Ferroresonantsi summutamise seadmed [4]

### 2.2.1. Metalloksiidpiirik (MO-piirik)

MO-piirik tagab mõninga summutusastme. Ta on võimeline piirama põhisageduslikku ferroresonantsi, kus pinged ületavad MO-piiriku piiri, aga ei suuda takistada ega kõrvaldada üleminekut subharmoonilisse olekusse, kus maksimaalsed subharmoonilised pinged on MO-piiriku tööpiirkonnast madalamad. Seepärast ei sobi nad üksi ferroresonantsi summutamiseks, kuid neid võib paralleelselt lisada filtrialehelasse või küllastusreaktoriahelasse, et parandada jõudlust. Samuti ei suuda MO-piirik pidevalt energiat absorbeerida. [4]

### 2.2.2. Mehaaniliselt lülitatav takisti

Mehaaniliselt sisselülitatavat takistit kasutatakse summutustakistuse lisamiseks, et kõrvaldada ferroresonants. Probleemiks on see, et lüliti avamine võib tekitada transiendi, mis võib viia trafo tagasi ferroresonantsolekusse. Seepärast, mehaaniline lüliti peab jääma sisselülitatud asendisse, kuni ferroresonants on lõplikult kõrvaldatud. Näiteks, kui pingetrafo ferroresonants tekib tänu võimsuslüliti pingeuhtlustuskondensaatoritele. Kui kõik lülitid, mis on ühendatud latile on avatud, siis pingetrafoga jadamisi ühendatud mahtuvus tekitab ferroresonantsahela. Kui kasvõi üks lüliti on suletud ja latt on pingestatud, siis ferroresonantsahel kõrvaldatakse. Selline lahendus on hea, kuni pingetrafo ja takistuse suurus on õigesti hinnatud. [4]

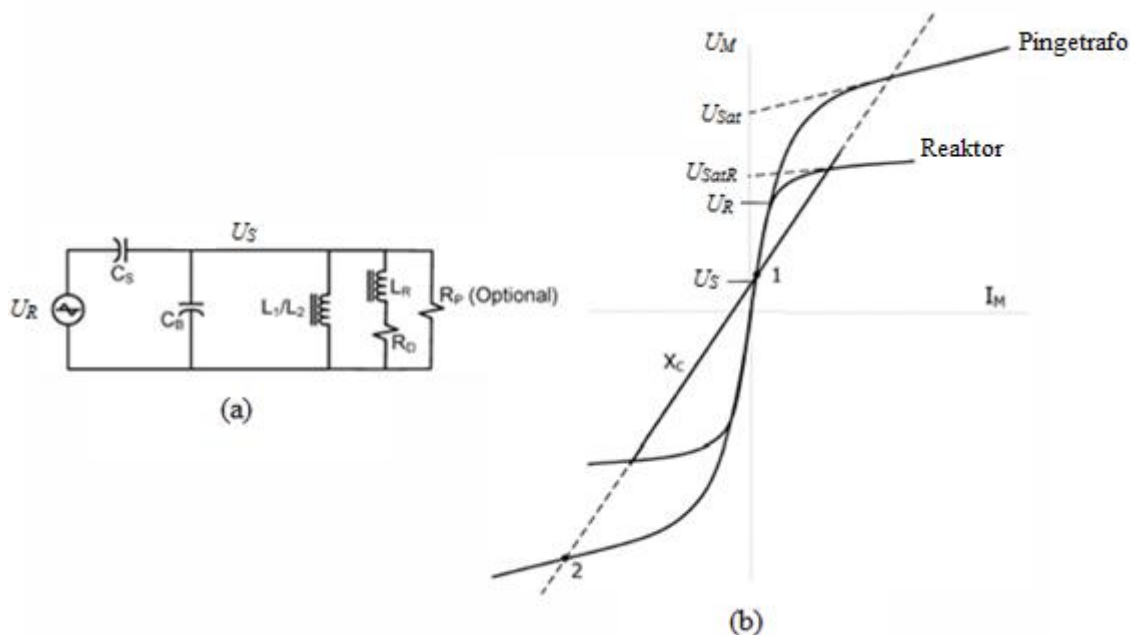
### 2.2.3. Filterahel

Filterahel on põhisageduslik blokeerimise filter, mis summutab harmoonikuid ja subharmoonilist ferroresonantsi ning tagab normaaltöö põhisagedusel. MO-piiriku lisamisel tagatakse lisakaitse ning vähendatakse ferroresonantsi summutamise aega. [4]



### 2.2.4. Küllastusreaktor

Küllastusreaktorit kasutatakse summutustakisti sisselülitamiseks, kui sekundaarpinge ületab lubatud piiri. Küllastusreaktor reageerib kõikidele harmoonikutele ja subharmoonikutele. Selline lahendus on kasutusel mahtuvuslikel pingetrafoedel ning sobib samuti ka teistele trafodele, kuid siis võib vaja minna erinevaid komponentide astmeid. Töö on suhteliselt lihtne ning on näidatud joonisel (Joonis 2.6). [4]



**Joonis 2.6. Ferroresonantsahel (a) ja küllastusreaktori töökarakteristik (b) [4]**

Küllastusreaktor on valitud nii, et tema küllastuspinge  $U_{satR}$  oleks natuke suurem kui pingetrafo nimisekundaarpinge  $U_R$ . Normaaltalitusel on küllastusreaktori mitteküllastunud magnetiline reaktiivtakistus väga suur võrreldes summutamistakistusega  $R_D$  ning seetõttu on peaaegu kogu pingetrafo sekundaarpinge reaktori ümber. Reaktor ei avalda mingit mõju pingetrafo koormusele. Kui tekib ferroresonantsahel nagu joonisel (Joonis 2.6a) ning pingetrafo ferroresonants üritab tekkida, reaktor küllastub enne pingetrafit ning lisab ahelasse summutustakistuse  $R_D$ . Küllastusreaktor on ferroresonantsolekus, kuid summutustakisti, kui ta on õigesti arvutatud, taastab normaaltöö mõne tsükli vältel. [4]

### 2.2.5. PTC-Termistor ehk posistor

Vaadates tagasi joonistele (Joonis 2.2b ja Joonis 2.5) võib näha, et sellist lähenemist kasutatakse ainult siis, kui pingetrafo sekundaarmähisele lisatakse summutustakisti avatud kolmnurga nurka, et kõrvaldada ferroresonants. Posistoreid kasutatakse maandamata süsteemides, kus ferroresonants tekib, kuid summutustakisti ei vasta soojuslikele nõuetele, mis on ettenähtud

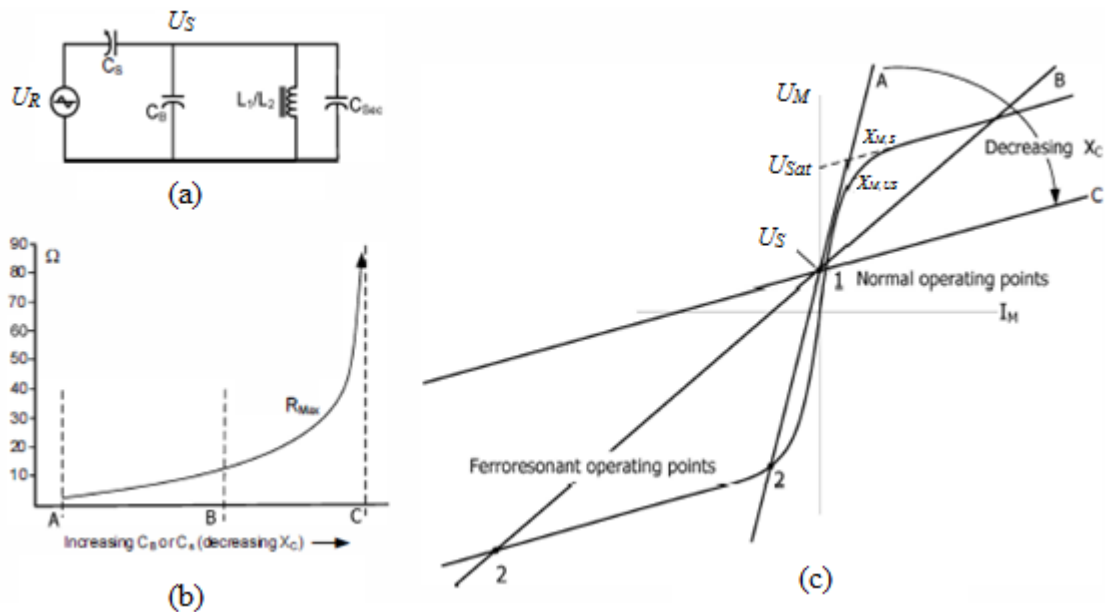
püsiva nulljärgneuspinge  $3U_0$  korral peale ferroresonantsi kõrvaldamist.  $R_{Th}$  on posistori takistus ja  $R_D$  on lisa summutustakistus.  $U$  tähistab pinge piiri ahelas nii, et kui trafo pinge  $U_T$  on ületatud siis triac (*triode for alternating current*) lülitatakse sisse, sulgedes summutusahela.  $U_T$  on sätestatud nii, et  $3U_0$  tasakaalustamatus on lubatud mitteferroresonantsahelas. Algselt on posistori takistus  $R_{Th}$  väga väike, mis hakkab kasvama mõne sekundi möödudes ning olenevalt posistori karakteristikust on võimeline tõusma mõnesaja oomini. [4]

Vaadates maandamata süsteemi, kus talitluse tingimus lubab tasakaalustamata mahtuvusel tekitada ferroresonantsi, tekib ferroresonantsi nulljärgneuspinge avatud kolmnurga mähisele ning sulgeb summutusahela, kõrvaldades ferroresonantsi ning taastades normaaltalitluse mõne tsükli vältel. Seejärel pinge  $U$  langeb alla  $U_T$  ning triac lülitatakse välja. Kui nüüd tekib häiring nagu näiteks maalühis maandamata süsteemis, tekib väga suur nulljärgneuspinge  $3U_0$  (mis on  $U_T$  sätestest kõrgemal), mis jääb mitteferroresonantsolekusse kuni maalühis on likvideeritud. Suur  $3U_0$  tekitab suure summutusvoolu, mis võib soojuslikult kahjustada pingetrafo või  $R_D$ -d ja teisi paralleelselt ühendatud koormusi. Sellisel juhul sulgeb triac summutusahela ja kõrvaldab ferroresonantsi ning mõne sekundi möödudes hakkab  $R_{Th}$  märgatavalt kasvama, vähendades voolu „pehmel“ viisil (ilma transiendi tekketa), kõrvaldades potentsiaalse soojusliku kahjustuse ning ferroresonantsi taastekke. Posistor jääb suletud asendisse kuni maaühendus on likvideeritud. Selline lähenemine sisaldab palju erinevat elektroonikat ning on hetkel saadaval seadmetele kuni keskpingeni. [4]

### 2.2.6. Ferroresonantsahela ümberseadistamine

On võimalikud lahendused, kus ahela takistus võib olla liiga suur efektiivseks summutamiseks või ahel, kus mahtuvustakistuse  $X_C$  kalle sunnib ühe punkti lahendusele, milleks on ferroresonantsolek. Vaadates ahelat joonisel (Joonis 2.7a) on mahtuvused  $C_S$ ,  $C_B$  ja  $C_{Sec}$  kujutatud joonisel (Joonis 2.7c) ekvivalentse mahtuvustakistusena  $X_C$  ning joontele  $A$ ,  $B$  ja  $C$  vastavad erinevad mahtuvuste  $C_B$  ja/või  $C_{Sec}$  väärtused. Joon  $A$  kujutab ühe punkti lahendust, kus ferroresonantsi ei saa summutada. Olukorra vältimiseks on vaja ahel ümber seadistada (*detune*) või muuta. Joone  $A$  ja trafo magnetkarakteristiku ristumine toimub küllastunud piirkonnas (punktis 2). Suurendades faasi ja maa vahelist mahtuvust  $C_B$  või lisades sekundaarmähisele mahtuvust  $C_{Sec}$  väheneb mahtuvustakistuse  $X_C$  väärtus. Kuna mahtuvustakistus  $X_C$  väheneb küllastunud induktantsi  $X_{M,S}$  suunas, kus ferroresonantsoleku punkt on suures küllastumise piirkonnas (kõverjoone  $B$  ristumine), on ferroresonantsoleku tekkevõimalus vähendatud või isegi kättesaamatu. Joonis (Joonis 2.7b) näitab, et kui  $X_C$  läheneb suurusele  $X_{M,S}$ , takistus  $R_{Max}$  suureneb, mistõttu on vaja vähem summutamist. Kui  $X_C$  jätkab vähenemist ning langeb alla  $X_{M,S}$

väärtuse (kõverjoon C), siis summutamist pole üldse tarvis, kuna tekib ainult üks punkt (punkt 1), mis on normaaltööpunkt. [4]



**Joonis 2.7. Ferroresonantsahel (a), aktiivtakistuse karakteristik mahtuvustakistuse muutumisel (b) ning magnetiline karakteristik mahtuvuste suurenemisel [4]**

### 2.2.7. Nulljärgnevusvoolu summutamine

Tasakaalustamata konditsiooni puhul, väljendub ferroresonantsiolek üleliigses nulljärgnevusvoolus, mis tekib südamikus koos pingenihega. See kehtib kolmefaasiliste südamikute puhul. Ühefaasilise südamiku puhul, moodustab nulljärgnevuspinge suure osa faasi ja maa vahelisest pingest. Seega nulljärgnevuspinge eemaldamine võib olla tõhus ferroresonantsi kõrvaldaja. Meetmete rakendamine töö talitlusse, tasakaalustamata pingete vältimiseks või tasakaaluoleku taastamiseks, võib olla piisav, kuid mõnedel juhtudel, kus tasakaalustamata olukorda ei ole võimalik vältida, on nulljärgnevuspinge summutamine sobilik lahendus nagu on näidatud joonisel (Joonis 2.2b). [4]

Tasakaalustamata olukord tekib elektrisüsteemides maa suhtes olevate faasimahtuvuste tasakaalustamatustest. Ekvivalentne nulljärgnevusahel koos takistuse ja avatud kolmnurk sekundaarmähisega on kujutatud joonisel (Joonis 2.8). [4]

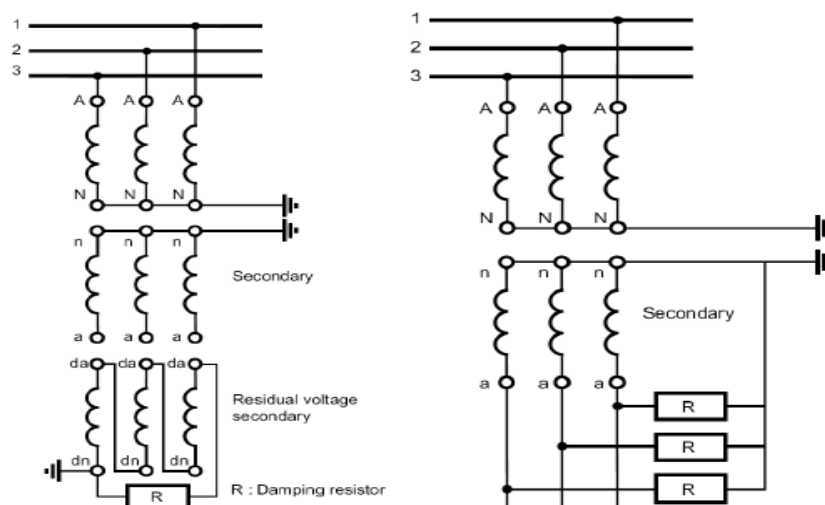
Joonis (Joonis 2.9) näitab faasi ja nulljärgnevuspingeid  $3U_0$  peale kolmefaasilise lati vabastamise ja mahtuvuste lisamise. Sellisel juhul pingetrafo ferroresonantsi ei esinenud, kuid teiste lattide vabastamisel tekkis. Sidestunud faasi pinge on umbes 25% lülituseelsest süsteemi pingest ning nulljärgnevuspinge  $3U_0$  on umbes 8%. Nulljärgnevuspinge  $3U_0$  näitab latimahtuvuse tasakaalustamatust. Sellisel juhul, kus  $3U_0$  on suhteliselt väike, ei ole nulljärgnevus



mis tekib üle takistuse  $R_D$  tasakaalustamata olukorra käigus ning ajast, mil ta seal püsib. See võib olla maksimaalne aeg, mis kulub kaitserieleel lülitamiseks, kuni lõpmatu ajahetkeni, mis kulub manuaalseks lülitamiseks. Summutustakisti, mis suudab hoida püsivat  $3U_0/R_D$  voolu, võib olla püsivalt ühendatud. Kui mitte, siis peaks alternatiivseid meetodeid kasutama. [4]

### 2.2.8. Faasi summutamine

Faasi summutamine on summutustakisti lisamine sekundaarmähisele nagu näidatud joonistel (Joonis 2.2 ja Joonis 2.10). Selline ühendus ei saa olla püsiv nii pingetrafole kui ka jõutrafole. Summutustakistus lülitatakse sisse/välja ferresonantsi summutamiseks. [4]



Joonis 2.10. Ferresonantsi summutustakistite kasutamine pingetrafolel [1]

### 3. Trafo ferroresonants

Trafo võimalus minna ferroresonantsiolekusse on otseselt seotud võrgupingega, mida suurem pinge, seda rohkem on trafo aldis ferroresonantsile. Lülitamise hetked, mis kutsuvad esile ferroresonantsi on need, kui võrgupinge möödub  $0^\circ$ . Vaadeldes kindlat võrgupinget ja kindlat lülitamise nurka, siis mida väiksem on mahtuvus (kriitilise piiri vahemik), seda suurem on tõenäosus põhiseduslikuks ferroresonantsiks. Üldiselt aga, mida suurem on mahtuvus, seda suurem on ka põhisedusliku ferroresonantsi liigpinge võnkumised ja madalam harmooniku moonutuse suhe pinge lainekujusse. [2]

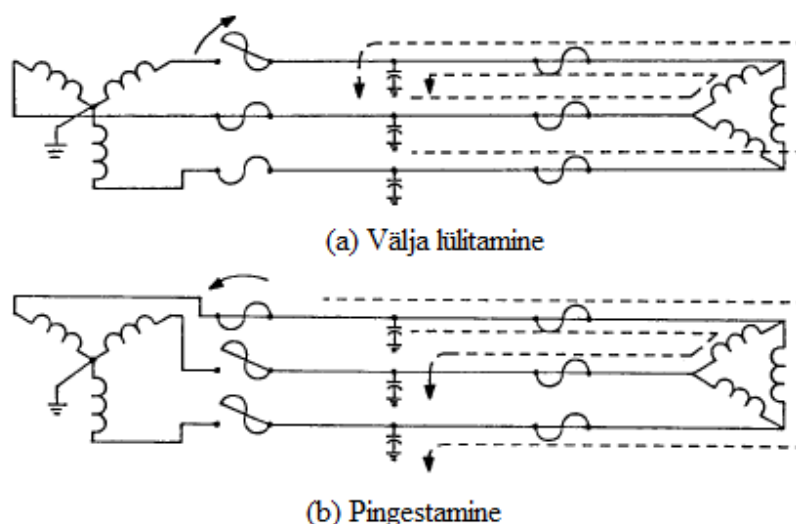
#### 3.1. Trafo ühendusviis ja ferroresonants

Jadaühendused, trafo küllastuva magnetahela ja võrgu mahtuvuste vahel, võivad tekkida kolmefaasilise ahela ühe- või kahepooluselisel sisse- või väljalülitamisel, moodustades ferroresonantsi teekonna. Analoogiliste olukordade põhjustajaks võib olla sulavkaitsme läbipõlemine ühes või kahes faasis, võimsuslüliti kontaktide mitteüheaegne talitus, faasijuhtme või -juhtmete katkemine. Ferroresonants võib antud juhul olla, kas põhiseduslik, subharmooniline või kaootiline, sõltuvalt mahtuvusest, trafo mähiste ühendamisviisist ja faaside ühendamisest. [1]

##### 3.1.1. Trafo primaarmähis ühendatud kolmnurka

Ahel, mis sisaldab maandamata kolmefaasilist trafot (maandamata täht, kolmnurk või ühefaasiline trafo faaside vahel) on aluseks jada LC võrguahela tekkele. Iga olukorra puhul on ekvivalenttsel ahelal induktiivsuse ja mahtuvuse jadamisi ühendus. Selliste ahelate puhul võivad tekkida suured pinged maa suhtes ning ohtu seada liigpingepiirikuid. [5]

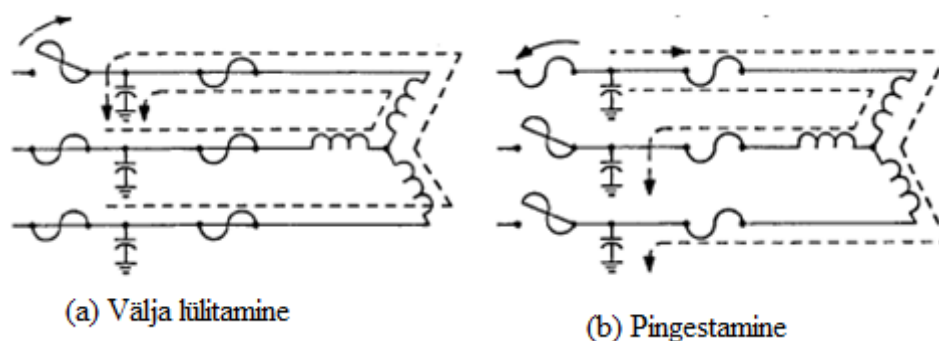
Joonisel (Joonis 3.1) on kujutatud ühe faasi väljalülitamine ja pingestamine. Ühe faasi väljalülitamisel tekivad ühendatud faaside kaudu kaks võimalikku ferroresonantsi teekonda. Läbi mähiste induktiivsuste maaga ühendatud mahtuvustesse mööda lahtise liini või kaabli. Faasi pingestamisel on kaks faasi endiselt lahti ning sarnased ferroresonantsiahelad tekivad läbi pingestatud faasi voolu ja trafo primaarmähiste, kahte saadavalolevasse mahtuvusse. [7]



**Joonis 3.1. Kolmnurka ühendatud trafo ühe faasi välja lülitamine (a) ja pingestamine (b) [7]**

### 3.1.2. Trafo primaarmähis maandamata täht

Joonisel (Joonis 3.2) olev maandamata tähtühenduses olev trafo on samuti tundlik ferroresonantsile. Joonis (Joonis 3.2) kujutab ühe faasi pingestamist ja väljalülitamist. Pingestamisel, esimene suletud faas annab voolu läbi kahe pingestamata trafo haru teiste liinide või kaablite mahtuvustele. Lahtiühendamise puhul, esimene lahtine haru jätab kaks haru pingestatuks luues kaks ferroresonantsi teekonda läbi primaarmähiste induktiivsuste mahtuvustele, mööda pingestamata liini või kaabli. [7]

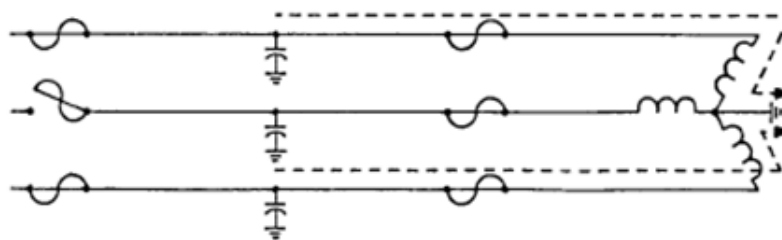


**Joonis. 3.2. Maandamata tähte ühendatud trafo ühe faasi väljalülitamine (a) ja pingestamine (b) [7]**

### 3.1.3. Trafo primaarmähis maandatud täht

Üks viis jadaühenduse ärahoidmiseks on tähte ühendatud primaarmähise neutraali maandamine nagu näidatud joonisel (Joonis 3.3). Ferroresonants teekonnad on lühistatud maatühendusega.

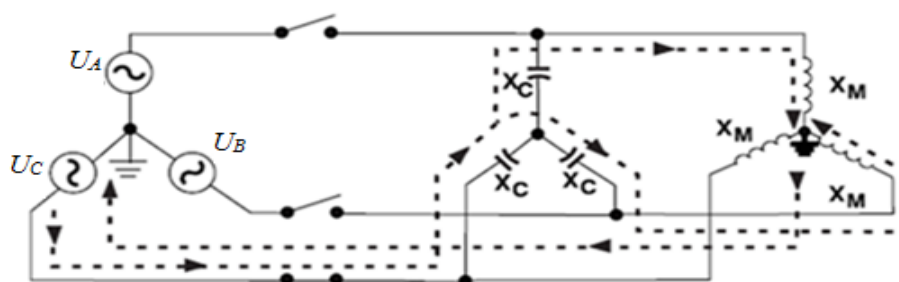
Kuna iga kolmefaasiline trafo omab sekundaarmähist, mida võib ühendada nii tähte kui kolmnurka, tekivad uued probleemid. [7]



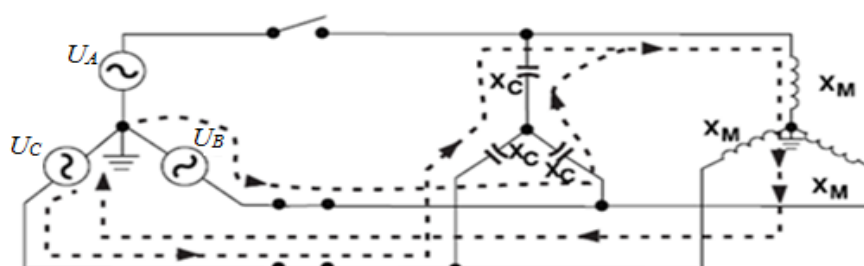
**Joonis 3.3. Maandatud tähte ühendatud trafo neutraali maandus [7]**

### 3.1.4. Maandatud tähtühenduses olev trafo ja liinifaaside vahelised mahtuvused

Selline konfiguratsioon on väga sarnane maandamata tähtlülituses olevate trafode konfiguratsioonile, kuid mahtuvustakistuse  $X_C$  suurused on palju väiksema ulatusega. Joonisel (Joonis 3.4) on näidatud ferreesonantsi teekond, mis tekib, kui üks faas on pingestatud. Joonisel (Joonis 3.5) on näidatud ferreesonantsi teekond, mis tekib, kui kaks faasi on pingestatud. [5]



**Joonis 3.4. Üks faas pingestatud, trafo maandatud tähtlülituses, koos liinifaaside vahelise mahtuvustega [5]**



**Joonis 3.5. Kaks faasi pingestatud, trafo maandatud tähtlülituses, koos liinifaaside vahelise mahtuvustega [5]**



### 3.1.5. Trafo YNd-lülituses

Kolmnurga sekundaarpoolele võib tekkida olukord, kus ühefaasiline häiring kantakse tagasi (*backfeed*) trafo primaarpoolele. Iga primaarpoole faasi võib avada, kas häiringu ajal või normaaltalitluse käigus, kuid kui avada faas *B* ning faasid *A* ja *C* on endiselt pingestatud, siis faasivoolud *A* ja *C* indutseeritakse sekundaarpoolele ning pinge surutakse ka mähise *B* sekundaarile. Kuna *B* mähis on endiselt magnetiliselt seotud primaarpoolega läbi trafo südamiku, tekib maa ja faasi *B* vahele pinge. See võib tekitada ferreesonantsi teekonna läbi lahtise liini mahtuvuste või hoida häiringut peal, vaatamata, et lüliti on lahti. Tulemuseks on kõrgepinge kaitseaparatuuri koordineerimise kaotus ning võimalik ka trafo läbipõlemine, kui maalühis jätkub. [7]

### 3.1.6. Trafo YNyn-lülituses

Sellise konfiguratsiooni puhul, neutraali ja maa vaheline ühendus katkestab trafomähise endainduktsiooni ferreesonantsi teekonnal. Trafo YNyn-lülitus hoiab ära häiringute ajal kondensaatorpatarei käitumist kui maandatud trafo. See ei ole täiesti ferreesonantsivaba ahel, kuna vajamineva induktiivsuse võib tagada magnetiline sidestus pingestatud ja pingestamata trafo mähiste vahel, mitte ühe mähise endainduktsiooni kaudu. [7]

### 3.1.7. Maandatud neutraaliga autotrafo ühendatud kolmnurka

Ferreesonants võib tekkida trafos, millel on kolmnurkühenduses olevad mähised isegi siis, kui trafo ja mahtuvuste neutraalid on maandatud. Suure mahtuvusega ülikõrgepinge trafodes on täiesti normaalne, et neutraal on maandatud otse ja tertsiaalühendus on kolmnurk. Kui ainult üks faas on häiritud ning teised kaks endiselt ühendatud, siis liigpingeid ei esine tänu kolmnurkühendusele. Kui aga kaks faasi on häiritud ning üks faas on endiselt ühendatud, siis tekib liigpinge, mis on põhjustatud ferreesonantsist. Liigpinge põhjuseks on korduv trafo südamiku magnetiline küllastus. Küllastuse põhjuseks on omakorda pinge tekkimine väljalülitatud faasidele läbi kolmnurkühenduse. [34]

### 3.1.8. Avatud kolmnurkühendusega pingetrafo

Probleem tekib: [35]

- koormamata trafo pingestamise ajal;
- ühe liini maalühise katkemise järel sekundaarpinge poolel.

Normaaltöö ajal on süsteemi pinged tasakaalus. Maalühised tekitavad suurt ebatasasust ning pinge tekkimist võimsuslülitel. Liigpingerelee, mis on ühendatud lülitiga, toimib, kui maalühise

tuvastaja ning lülitab madalpinge lüliteid. Suur tasakaaluta olek põhjustab liigpingeid, mis viivad pingetrafo küllastusse. Kui nüüd mahtuvus trafo sekundaarpoolel on kindlas vahemikus, tekib ferresonants. Mahtuvuse suurusel sõltub ka ferresonantsi tüüp. Avatud kolmnurga puhul on täheldatud kolme tüüpi ferresonantsi, kolmanda harmooniku resonants (väike mahtuvus), põhisageduslik resonants (keskmine mahtuvus), subharmooniline resonants (suur mahtuvus). [35]

### **3.2. Jõutrafo ferresonants**

Kohe peale trafo fiidri väljalülitamist võib trafo minna küllastusse, tänu isoleeritud võrgu mahtuvuse tühjenemisele maasse, tekivad mittelineaarsed võnked reaktiivsete komponentide vahel. Ferresonantsi teke sõltub erinevatest süsteemi ja alajaama parameetritest ning võib liigitada stohhastiliseks või isegi kaootiliseks. Suurbritannia kogemuse põhjal võib väita, et jõutrafo kogevad ferresonantsi olekut ühel korral kümnest väljalülitusest. Tavaliselt tekib mittesiinuline vool vahemikus 200-350 A sagedusel 50 Hz või selle subharmoonikul (16,33 Hz). Kuna trafo on viidud küllastusse, võib lekkevoog põhjustada ülekuumenemise ning püsiva kahjustuse trafo südamikule ja mähistele. Liigpingepiirid ei saa ferresonantsi summutamisega hästi hakkama, kuna trafo suurim ferresonantsist tingitud pinge suurus on madalam kui liigpingepiiriku toimimise algus. [27]

### **3.3. Induktiivse pingetrafo ferresonants**

Kohe peale pingetrafo väljalülitust tekivad võnked pingetrafo induktsiooni ja võrguga endiselt seotud maaga ühendatud mahtuvuste vahel. Kindlate alajaamade konfiguratsioonide puhul, eriti SF6 võimsuslülitega alajaamade puhul ja koos ühendatud väikese võrgumahtuvusega, püsiv resonants on võimalik. Pingetrafo võib viia küllastusse läbi tühjeneva energia, mis on lõksus ühendatud võrgu mahtuvustes. Võnkumiste püsimise energia tuleb läbi võimsuslüliti pingeühtlustuskondensaatorite. Püsiva resonantsi tõenäosus suureneb, kui pingetrafo on ühendatud väiksesse võrku. Halvimal juhul võivad tekkida väga kõrged voolud ning pinged, mis võivad ulatuda 4 suhtühiku suuruseni. [27]

Kõik pingetrafo on suhteliselt nõrga soojusliku vastupidavusega ja ülekuumenemine võib viia isolatsioonirikkeni väga kiiresti, eriti põhisagedusliku ferresonantsi puhul. Induktiivsed pingetrafo pole varustatud ferresonantsi tuvastamise vahenditega ning seetõttu võib ferresonants jääda märkamata pikaks ajaks. [27]

Isoleeritud neutraaliga võrku ühendatud induktiivne pingetrafo, mis on lähestikku mahtuvusliku allikaga, on suuresti aldis ferresonantsile. Transientliigpingetest tingitud lülitusest või

maalühisest võib tekkida ferresonants, viies paralleelselt olevate ühe või kahe pingetrafo südamikud küllastusse. Ferresonantsi täheldatakse siis nii faasi ja maa vahelistes pingetes kui ka neutraali punktil. Neutraali punkt nihkub ja pinge ühes või kahes faasis tõuseb maa suhtes. Sõltudes magneetimisinduktsioonist ja mahtuvusest on ferresonants põhisageduslik, subharmooniline või kvaasiperioodiline. [6]

Ferresonantsi vältimiseks või summutamiseks induktiivsetes pingetrafoodes, ühendatakse sekundaarmähisega summutustakistus  $R$  igale trafole. Sellisel juhul takistus neelab võimsust kohe, kui trafo pingestatakse. Kui pingetrafo omab kahte sekundaarmähist (üks mõõtmiseks ja teine ehk tertsiaalmähis jääkpingele) on soovitatav ühendada takistus avatud kolmnurga tertsiaalmähise terminalidele. Eeliseks on see, et lisatakistus ei mõjuta mõõtmistäpsust ning ei teki kadusid normaaltöö ajal, vaid ainult avariitalitluses. Vähima soovitatava takistuse suuruse ja võimsuse saab arvutada valemitega (3.1) ja (3.2). [6]

$$R = \frac{3\sqrt{3}U_n^2}{P_e} \quad (3.1)$$

$$P_R = \frac{U_n^2}{R} \quad (3.2)$$

Kus  $U_n$  on mähise nominaalpinge ja  $P_e$  pingetrafo soojusliku koormuse piir. Soojuslik koormus on kogu koormus, mida trafo suudab taluda ilma üleliigse temperatuuri tõusuta. [6]

### 3.3.1. Pingetrafo ferresonantsoleku uurimus

Pingetrafo on suuresti alid ferresonantsi langetama tänu nende mittelinearsele talitluse karakteristikule. Kuna nad on disainitud töötama tühijooksu sarnasele olukorrale. Induktiivsed pingetrafo on väga tundlikud ferresonantsile, kuna neil on veel kõrgem induktiivne karakter ning nad vajavad vähem mahtuvust, et moodustada ferresonantsahel. Induktiivsed pingetrafo on eriti alid ferresonantsile, kui tegemist on isoleeritud neutraaliga võrguga või kui võrku toidetakse võimsuslülititest, mis sisaldavad pingeühtlustuskondensaatoreid. [2]

Uuritava pingetrafo andmed on näidatud tabelis (Tabel 3.1). [36]

**Tabel 3.1. Uuritav pingetrafo [36]**

Mähis	Pinge	Aktiivtakistus	Reaktiivtakistus	Keerdude arv
Primaar	20 kV	1,639 $\Omega^{(2)}$	1,866 $\Omega^{(2)}$	31630
Sekundaar	230 V	1,124	0,66	368

<sup>(2)</sup> – Teisendatud sekundaarpoolele

Selle trafo uurimiseks arendati tarkvaramudel programmis *MATLAB/Simulink* baseerudes tabelis (Tabel 3.1) olevatele andmetele. Kõigepealt selgitatakse välja kriitiline mahtuvuse suuruse

vahemik, mille puhul pingetrafo läheb ferroresonantsolekusse. Antud mudeli puhul jääb see vahemikku 0,4-15  $\mu\text{F}$ . [36]

$$\omega L_{lin} < \frac{1}{\omega C} < \omega L_{sat} \Rightarrow 0,4 < C < 15 \mu\text{F} \quad (3.3)$$

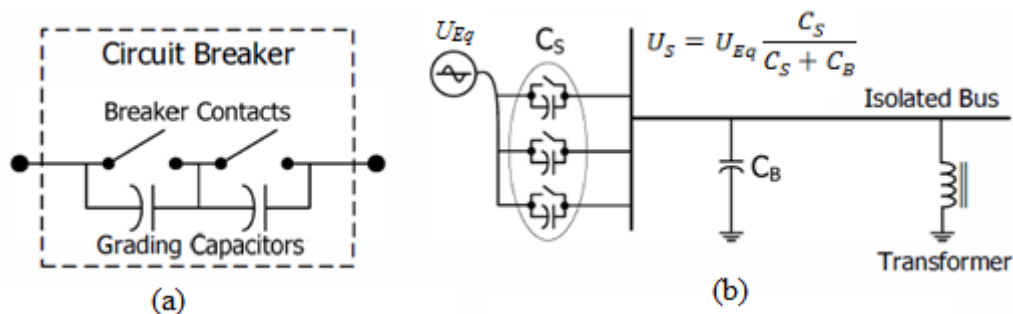
Nüüd saab simuleerida vajalikud tingimused, et uurida pingetrafo käitumist ferroresonantsiolekus. Selle jaoks muudetakse erinevaid parameetreid nagu võrgupinge, pikimahtuvuse suurus ja lülitamise hetk. Kasutatakse nende kolme suuruse variatsioone: [36]

- muudetakse võrgupinget vahemikes 16 kV-24 kV, 500 V kaupa;
- muudetakse mahtuvuse suurusi vahemikes 0,4-15  $\mu\text{F}$ , 0,1  $\mu\text{F}$  kaupa;
- muudetakse lülitamise nurka vahemikes 0-360°, 30° kaupa.

Ferroresonantsi eristamiseks kasutatakse Poincare sektsiooni (*Poincare section*) ja faasitasandi diagramme (*phase plane diagram*). Faasitasandi diagrammi kasutatakse, et analüüsida süsteemi muutust ajas, pannes kokku kaks muutujat (pinge ja magnetvoog). Tulemuseks on kindla punkti liikumise trajektor (perioodiline lahendus vastab kinnisele trajektorile). Poincare sektsiooni perioodiline lahendus koosneb ühest punktist. [2] Poincare sektsioon on lihtne faasitasandi trajektoori salvestis, konstantsel ajahetkel. Poincare sektsioon saab anda kasulikku infot tekkiva sageduse (sagedus, mis üritab ennast läbi suruda) ja süsteemi sageduse suhtest. Näiteks, kui tegelik ferroresonantsi lainekuju periood on 3x20 ms, siis tekib kolm punkti. Kaootilise lainekuju puhul tekib aga Poincare sektsioon, mis koosneb paljudest juhuslikest punktidest kindlal alal. [36]

### 3.3.2. Pingetrafo ferroresonants pingeuhtlustuskondensaatoritega võimsuslülitis

Kõrgepinge võimsuslülitid vajavad tavaliselt mitut jadamisi ühendatud kontaktpaari, et jaotada transiendist tingitud pingehüppeid ühtlaselt kontaktpaaride vahel. Pingeuhtlustuskondensaatorid on ühendatud iga kontaktpaariga paralleelselt nagu näidatud joonisel (Joonis 3.6a), et tagada võrdne pingajaotus häiringute korral. Mahtuvuse suurus võimsuslülitit ümber sõltub kontaktpaaride arvust ning kondensaatorite suurusest. [4] Kambrite arv on tehnoloogia arenguga järjest vähenenud. Näiteks 230 kV õhkvõimsuslülitit jaoks on tarvis 4-6 kambrit, vähese õlilüliti jaoks 2-4 kambrit ja SF6 lüliti vajab kahte kambrit. Tüüpiline kondensaatori mahtuvus õhklüliti puhul on 30-800  $\mu\text{F}$ , vähese õlilüliti puhul 800-1350  $\mu\text{F}$  ning SF6 lüliti puhul 1500-1600  $\mu\text{F}$ . [35]

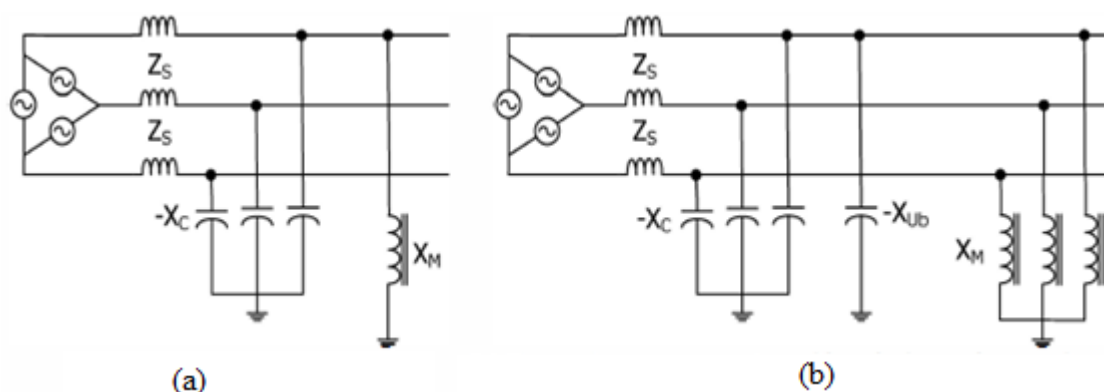


**Joonis 3.6. Võimsuslüüti pingehütluskondensaatoritega (a) ja lati ferroresonants konfiguratsioon (b) [4]**

Mitmed releed võivad olla ühendatud isoleeritud latile ning summaarne mahtuvus  $C_S$  tekitab latile suure pingetõusu  $U_S$  mahtuvusega  $C_B$ . Selline konfiguratsioon võib viia trafo küllastumiseni ning tulemuseks on subharmooniline ferroresonants, mis mõjutab ennekõike induktiivseid pingetrafosid, kuid võib mõjutada ka jõutrafosid, kui suur hulk releesid on ühendatud isoleeritud latile. [4]

### 3.3.3. Pingetrafo rakendus maandamata süsteemis

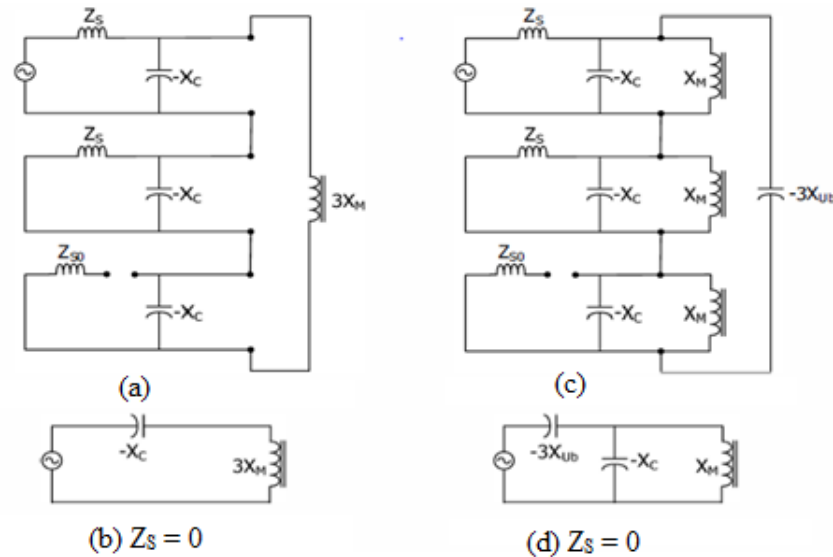
Faasi ja maa vahelises ühenduses olev pingetrafo, mis on ühendatud maandamata süsteemi, on aldis ferroresonantsi tekkele ning sellist konfiguratsiooni tuleks vältida. Joonisel (Joonis 3.7) on näidatud kaks sellist konfiguratsiooni, ühefaasiline maandatud pingetrafo ning kolmefaasiline maandatud pingetrafo tasakaalustamata faasimahtuvustega maasuhtes. Jadavõrgustikuga tuletatakse ferroresonantsi ahel. [4]



**Joonis 3.7. Ühefaasiline maandatud pingetrafo (a) ja kolmefaasiline maandatud pingetrafo tasakaalustamata faasimahtuvustega maasuhtes [4]**

Ühefaasiline pingetrafo, mis on ühendatud maandamata süsteemi, põhjustab ferroresonantsi tänu faasi ja maa vahelisele mahtuvusele ja ühefaasilise trafo tasakaalustamata efektile nagu on näidatud joonisel (Joonis 3.7a). Positiivne, negatiivne ja nulljärgnevus ahelad on

ühendatud  $3X_M$ -ga nagu on näidatud joonisel (Joonis 3.8a). Kuna allika näivtakistuse suurus  $Z_S$  on väga väike võrreldes takistuste  $X_C$  ja  $X_M$  suuruslega, võib sellega mitte arvestada ning ekvivalentne ferreesonantsahel on näidatud joonisel (Joonis 3.8b). [4]

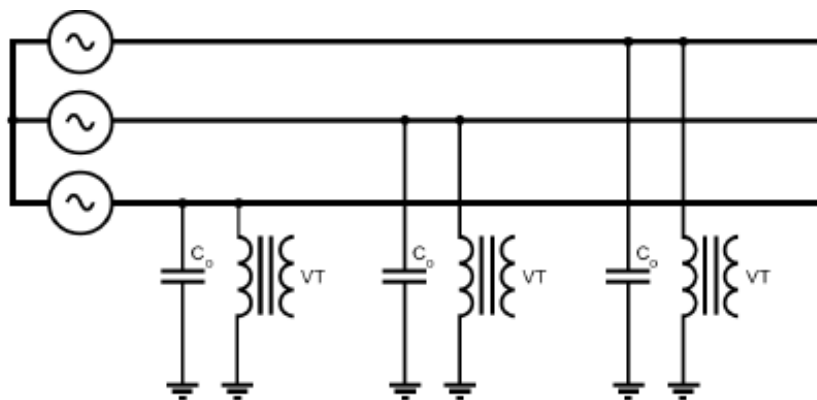


**Joonis 3.8. Ühefaasilise pingetrafo nulljärgnevusahel (a) ekvivalentse aseskeemiga (b) ja kolmeefaasilise pingetrafo nulljärgnevusahel (c) ekvivalentse aseskeemiga (d) [4]**

Maandamata süsteemis olevad kolmeefaasilised pingetraford põhjustavad ferreesonantsi maa suhtes olevate faasimahtuvuste tasakaalustamatusest nagu on näidatud joonisel (Joonis 3.7b). Lihtsustamaks ahelat analüüsiks, on tasakaalustamata faasimahtuvused maasuhtes näidatud negatiivse suurusena  $-X_{Ub}$  ning tasakaalus mahtuvustakistus on näidatud  $-X_C$ . Positiivne, negatiivne ning nulljärgnevus ahelad on ühendatud  $-3X_{Ub}$  nagu näidatud joonisel (Joonis 3.8c). Kuna allika näivtakistuse suurus  $Z_S$  on väga väike, võrreldes takistuste  $X_C$  ja  $X_M$  suuruslega, võib selle välja jätta ning ekvivalentne ahel on näidatud joonisel (Joonis 3.8d). [4]

### 3.3.4. Isoleeritud neutraaliga võrku ühendatud pingetrafo

Koormuse, lühisvoolu või maaühendusrikke väljalülitamisel esinevad transientliigpinged või -voolud võivad põhjustada ühe või kahe pingetrafo küllastumist ja esile kutsuda ferreesonantsi. Joonisel (Joonis 3.9) on näidatud pingetraford isoleeritud neutraaliga võrgus. [1]



**Joonis 3.9. Pingetrafo isoleeritud neutraaliga võrgus [1]**

Sõltuvalt pingetrafo magnetimisinduktiivsusest ja võrgu mahtuvusest maa suhtes, võib ferroresonants olla põhisageduslik, subharmooniline või kvaasiperioodiline. [1]

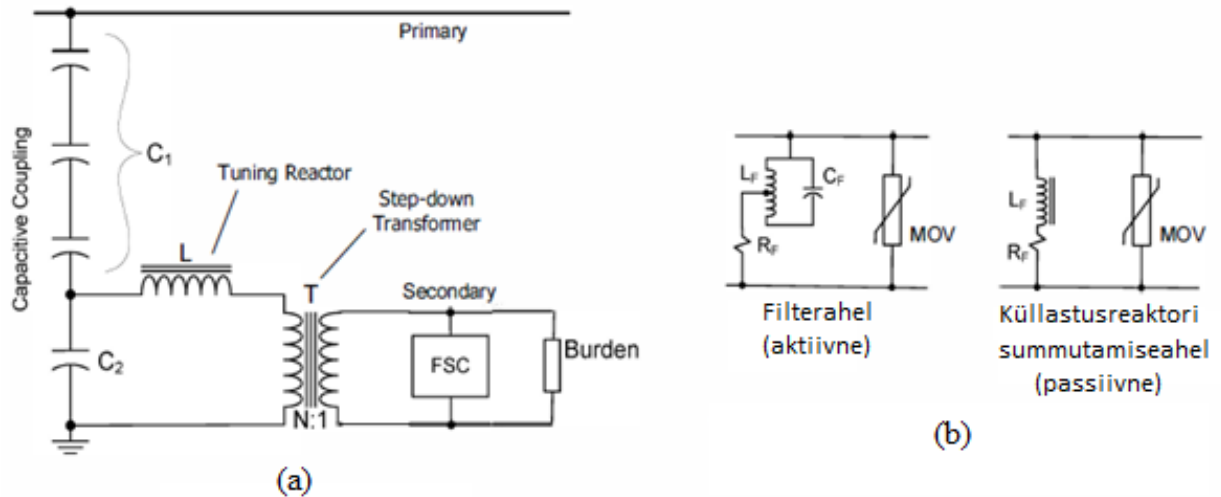
### 3.4. Mahtvusliku pingetrafo ferroresonants

Mahtvuslikud pingetrafo omavad väga häid ferroresonantsi omadusi ning tootjad on sellest ka teadlikud. Seetõttu toodetakse trafosid, mis juba sisaldavad erinevaid ferroresonantsi summutamise komponente, mis on paigaldatud sekundaarpinge mähisele. [27] Vajalik summutamise aeg võib kesta mitu tsüklit. Ferroresonants moonutab suurelt mahtvusliku pingetrafo näitu esimese 3-5 tsükli jooksul ning järgneb keskmine moonutus järgneva 4-6 tsükli jooksul. Selline käitumine pingetrafo poolt on hästi arusaadav ning ei oma suurt mõju. Mahtvusliku pingetrafo ferroresonantsi kaitset võib täiustada, ilma, et peaks suuri muutusi tegema. Hästi seadistatud kaitsesädemik võimaldab ferroresonantsi summutada juba kahe tsükliga. Teatud juhtudel võib kasutada ka MO-piirikuid. [37]

Mahtvuslik pingetrafo omab kolme tähtsat elementi, mahtvuslikku jagajat, reaktorit ja trafot. Üks ferroresonantsi ennetamise käsitus on hoida trafo alati mingi koormuse all. Teine lähenemine on lisada põhisageduse tööle jadamisi koormust ehk ahel laseb põhisageduslikul töö koormust läbi ning teistel sagedustel juhib koormuse läbi takisti. Kolmas lähenemine on lisada pingetundlik koormus, kui pinge tõuseb lubatust kõrgemale, siis küllastunud reaktor lisab koormust. Neljas lähenemine on lisada liigpingepiirikuid nagu MO-piirik, mis haarab kõik ebanormaalselt kõrged pingehüpped, mida võiks seostada ferroresonantsiga. MO-piiriku eelis on stabiilne karakteristik, lihtne disain ja kõrge töökindlus, kuid ta suudab vaid piiratud koguses energiat haarata. [6]

Selliste elementide lisamisel ei pea kasutaja mõtlema ferresonantsi tekkest pingetrafoodes, kuid kasutaja peab arvestama, et sellised ahelad võivad mõjutada mahtuvusliku pingetrafo tööd, eriti kui suured pingehüpped ja nurgamuutused aset leiavad. [5]

Mahtuvusliku trafo ekvivalentne ahel ning ferresonantsi summutamise filter on näidatud joonisel (Joonis 3.10). [4]



**Joonis 3.10. Mahtuvusliku pingetrafo ekvivalentne ahel (a) ja ferresonantsi summutamiseahelad koos liigpingepiirikutega [4]**

Ferresonantsi summutamise filter võimaldab harmoonikute ja subharmoonilise ferresonantsi summutamist ning tagab pingetrafo normaaltöö. Küllastusreaktoriahel kasutab küllastunud reaktorit, et aktiveerida summutustakisti, kui sekundaarpinge ületab lubatud piiri. See reageerib kõigile harmoonikutele ning subharmoonilistele pingetele. MO-piirik tagab lisa liigpingekaitse ning vähendab ferresonantsi summutamise aega. Kuigi ferresonantsi summutamise filter on efektiivne ferresonantsi kõrvaldamisel, mõjutavad nad ajutiselt ka pingetrafo täpsust häiringute ajal. [4]

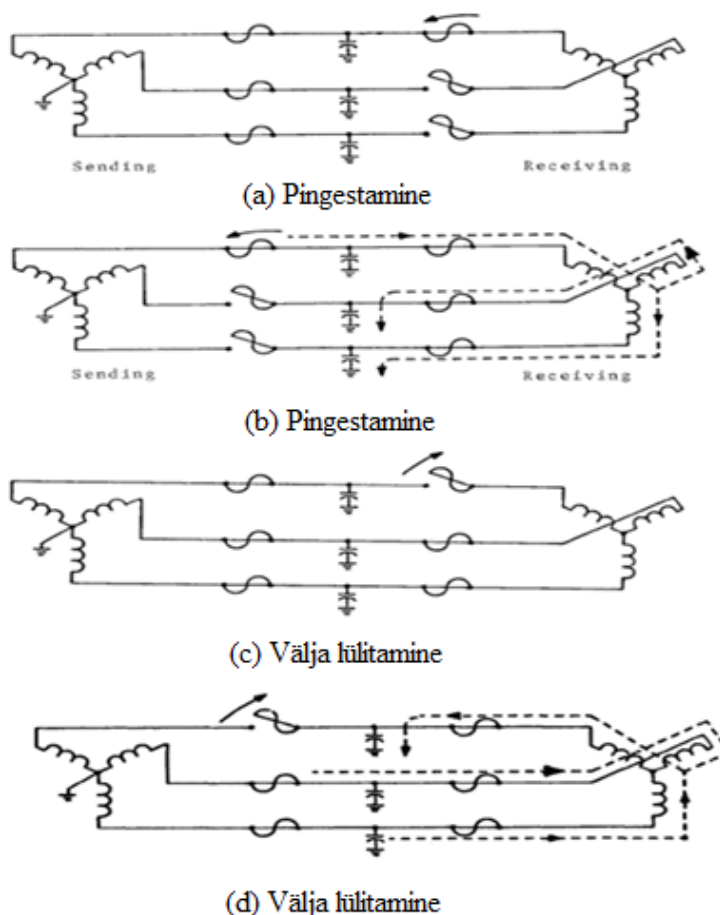
CSA (*canadian standards association*) nõuab, et mahtuvuslikud pingetrafo peavad olema disainitud nii, et võrgusagedusel ei tekiks püsivaid subharmoonilisi või stabiilseid liigpingeid. CSA nõuab ferresonantsi katseid, mis näitaksid transienti sumbumist kümne tsükli jooksul, kui mahtuvuslikule pingetrafole anda 1,2 suhtühiku suurune või lühem kui 1,5 s kestev 1,5 suhtühiku suurune laeng. ANSI c93.1 standardis puuduvad ferresonantsi summutamise nõuded, vajalikud on ainult katsed 1,1 suhtühiku suurusel pingel. [35]



### 3.5. Süsteemi ferroresonants konfiguratsioonid

#### 3.5.1. Trafo lülitamise järjekord

Lülitamise järjekord on tähtis, kui pingestada ja väljalülitada trafosid, mis asuvad liini või kaabli lõpus. Joonise (Joonis 3.11a) puhul, sulgedes ahela trafo poolele, ei teki vajalikku jadaühendust elementide vahel, et ferroresonants esile kutsuda. Vastupidisel juhul, tekib sulgedes jadaühendus võrgupinge rauast südamikute induktsiooni, aktiivtakistuse ja mahtuvuse vahel, nagu on näidatud joonisel (Joonis 3.11b), mis võib viia ferroresonantsini. Väljalülitamine trafo poolele, nagu näitab joonis (Joonis 3.11c), omab väiksemat tõenäosust ferroresonantsi tekkeks. Ühendades aga, nagu joonisel (Joonis 3.11d), tekib ferroresonantsi võimalus mööda igat sisselülitatud faasi, mis omab jadaühendust võrgupinge, rauast südamikute induktsiooni, aktiivtakistuse ja mahtuvuse vahel. [7]

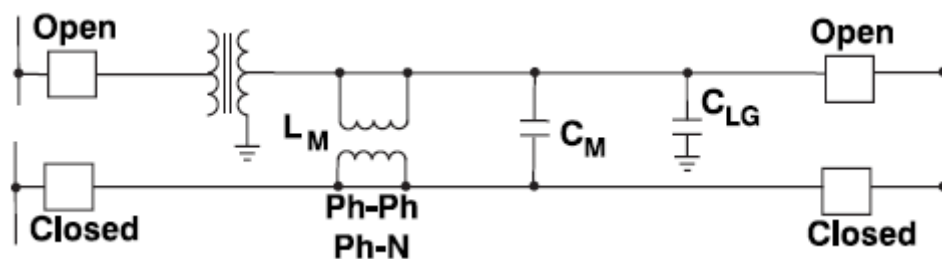


**Joonis 3.11. Ühe faasi pingestamine trafo poolel (a), ühe faasi pingestamine süsteemi poolel (b), ühe faasi välja lülitamine trafo poolel (c) ning ühe faasi välja lülitamine süsteemi poolel (d) [7]**

### 3.5.2. Ühine ühendus koormamata liini ja trafo vahel

Kahe liini vahelisel ühendusel räägitakse tavaliselt nulljärgnevusühendusest ehk nulljärgnevusvool ühel liinil indutseerib nulljärgnevuspinget kõrvalolevale liinile. Samuti on olemas sarnane, aga nõrgem ühendus kahe liini vahel, mis tekib, kui esinevad positiivsed pinged ja vooluvood. Ühendus võib olla nii mahtvuslik kui ka induktiivne. Oletame, et liin  $X$  faasidega  $A, B, C$  ja liin  $Y$  faasidega  $A', B', C'$  jooksevad ühiselt tornilt. Ühine ühendus on seotud asjaoluga, et faasid  $A$  ja  $A'$  on üksteisele lähemal kui  $A-B'$  ja  $A-C'$ , niisiis avatud faas  $A$  on mahtvuslikult rohkem ühenduses faasiga  $A'$  kui faaside  $B'$  ja  $C'$  ning seetõttu on faas  $A$  osaliselt pingestatud potentsiaalini  $A'$ . Samuti võib tekkida sarnane ühefaasiline magnetiline ühendus. Enamus juhtudel on ühendus liiga nõrk, et arvestada seda elektrisüsteemide uuringutel, kuid võib olla piisav, et tekitada ferreesonantsolek sellele liini osale, mis on isoleeritud ning jääb pingestamata trafo ja maasuhtes olevate liinimahtuvuste vahele. [5]

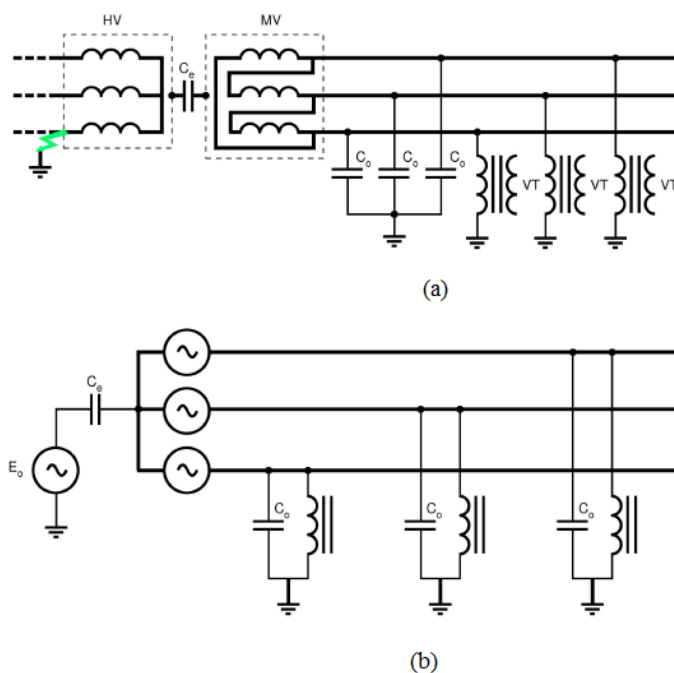
Joonisel (Joonis 3.12) on näidatud olukord, kus ainuke koormus pingestamata liinile on trafo magnetiline impedants, mis võib olla nii pingetrafo kui jõutrafo. Pingestatud liin ühendub mahtvuslikult ja induktiivselt pingestamata liiniga. Kui nüüd ahel hakkab võnkuma (mõne rikke tõttu pingestatud ahelas, mis indutseerib suure nulljärgnevuspinge pingestamata paralleelselt olevale liinile), võib tekkida püsiv resonants. [5]



Joonis 3.12. Ühine ühendus koormamata liini ja trafo vahel [5]

### 3.5.3. Trafo kõrgepingepoolel ühefaasiline lühis, keskpingepoolel pingetraford

Ferreesonants võib tekkida, kui trafo mõlemad mähised on isoleeritud neutraaliga, pingetraford on koormamata ja on lülitatud keskpingepoolel faaside ja maa vahele ning ühefaasiline lühis on kõrgepingepoolel. Joonisel (Joonis 3.13) on näidatud võimalik ferreesonantsi juhtum isoleeritud neutraaliga võrgus. [1]



**Joonis 3.13. Võimalik ferroresonantsi juhtum isoleeritud neutraaliga võrgus, lähteskeem (a) ja nulljärgnevusskeem (b) [1]**

Lühise korral tekib kõrgepingepoolel oluline neutraali pingenihe. See pingenihe kandub läbi trafo mähistevahelise mahtuvuse pingetrafodeni ja võib vallandada ferroresonantsi. Selline ferroresonants on põhisageduslik. [1]

### 3.5.4. Mahtuvuslikud alajaamad

Mahtuvuslik alajaam, mis on mõeldud edastama elektrit maapiirkondadesse, ei vaja kallist jõutrafot, mistõttu on ka palju odavam. Ferroresonants on suureks probleemiks sellise tehnika kasutamisel. Peamine mure mahtuvuslike alajaamade kasutamisel on nende transient käitumine. [38]

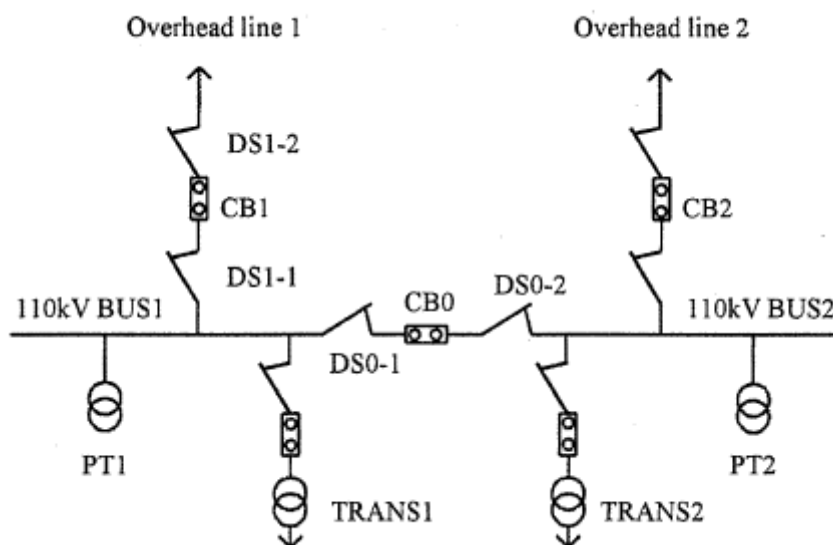
Mahtuvusliku jaotamise tehnikat tuntakse juba mõnda aega, kuid selle kasutamine kõrgepinge ülekandmiseks keskpingele, et jaotada elektrit laiale alale, on hiljutine. Sellise konfiguratsiooni puhul võetakse energiat kõrgepinge ülekandeliinidelt, kasutades diskreetseid kondensaatoreid ning viiakse maa- ning tööstuspiirkondadesse läbi väikese trafo. [39]

Tuntud ferroresonantsi summutamise tehnikad, nagu kolmefaasiline lülitus ja primaarpingepoolel maandatud tähtühenduse kasutamine, ei ole efektiivsed mahtuvuslikes alajaamades. Kasutusele peaks võtma uuemad tehnikad nagu võnkesummutusfiltri lisamine ja jõuelektronika kasutamine. [38] *Aghazadeh* [39] pakub välja töökindla meetodi RLC summutusfiltri kasutamisele, et maha suruda transientliigpingeid ja ferroresonantsi. Seda tehnikat testiti erinevates transient olukordades, kus liigpinged võivad tekkida ning näitasid

meetodi kasutamise kasulikkust. Liigpingepiirike kasutamine nendes alajaamades võib veelgi parandada transientliigpingete summutamisel.

### 3.5.5. Maandatud neutraaliga alajaam

Joonisel (Joonis 3.14) on näidatud maandatud neutraaliga alajaam, mida toidetakse kahest 110 kV õhuliinist. *CB0*, *CB1* ja *CB2* on võimsuslülitid, mis sisaldavad kondensatoreid ning *PT1* ja *PT2* on ühefaasilised pingetraford. Kui lahkülitid *DS0-1*, *DS0-2*, *DS1-1* ja *DS1-2* on suletud ning üks võimsuslülitit (*CB0* või *CB1*) on avatud, tekib teise võimsuslülitit avamisel resonants latil *BUS1*. Suure tõenäosusega tekib resonants uuesti, kui avada ka mõni lahkülititest. [29]



**Joonis 3.14. Maandatud neutraaliga alajaam [29]**

Takistuse lisamine pingetrafo kolmnurkühenduses olevasse sekundaarahelasse ei suuda ferresonantsi kõrvaldada. Lisades aga takistust, pingetrafo tähtühenduses olevasse sekundaarahelasse, on võimalik fenomen kõrvaldada. Kriitiline takistuse suurus arvutati teoreetiliselt ning täiendati *EMTP* simulatsiooniga. Takistus peab koosnema paralleelselt ühendatud takistitest. Nad ühendatakse võrku üheaegselt, aga väljalülitatakse kordamööda, et vältida ferresonantsi taasteket. [29]

## Lõputöö kokkuvõte

Resonants esineb ahelates, kus induktiiv- ja mahtuvustakistus saavad võrdseks. Eristatakse rööpresonantsi ja jadaresonantsi. Rööpresonants tekib, kui võrdse takistusega mahtuvus ja induktiivsus on ühendatud rööpselt. Jadaresonants esineb ahelates, kus induktiivsus ja mahtuvus on jadaühenduses ja nende omavõnkesagedus on lähedane võrgus esinevale sagedusele. Resonantsi olukorras on induktiivpinge ja mahtuvuspinge võrdsed ja vastassuunalised. Eristatakse kolm resonantsi tüüpi: võrgusageduslik resonants, kõrgema harmooniku resonants ja ferroresonants. Võrgusageduslik resonants esineb ainult harvadel juhtudel, seoses riketega. Kõrgema harmooniku rööpresonantsi võib põhjustada võimsustegurit parandavate põikkondensaatorite ja trafo ühendus. Ferroresonantsiks on vaja ahelat, mis sisaldab mittelineaarset induktiivsust, mahtuvust, pingesallikat ja madalaid kadusid.

Ferroresonantsi liigitatakse pingelaine spektraalse koosseisu järgi nelja eri klassi: põhiseduslik, subharmooniline, kvaasiperioodiline ja kaootiline resonants. Põhiseduslik resonants on enamlevinud ferroresonantsilek, mida on ka kõige lihtsam analüüsida. Põhisedusliku ferroresonantsi lainekuju võngub talitlussagedusel, kuid omab võrgupingest kordades suuremat pinget. Subharmooniline resonants hõlmab endas põhisedusest perioodiliselt suuremaid võnkumisi (16.33 Hz) ning tema lainekuju võib olla nii sümmeetriline kui ka asümmeetriline. Kvaasiperioodiline resonants on katkendliku spektriga, kus sagedused on kombineeritud mitmest irratsionaalarvulisest sagedusest. Lainekujul on korduv muster aga erinevad tipud igal kordusel ning perioodid, mis samuti ei ole võrdsed. Kaootilise resonantsi puhul on lainepikkused mitteperioodilised ning lainekuju omab ka erinevaid tipupingeid.

Ferroresonantsahela lihtsad analüüsimise meetodid on faasoranalüüs, lineaarse ahela analüüs ning magnetkarakteristiku kaksikoleku analüüs. Faasoranalüüs on lihtne ning efektiivne võrguahela analüüs, kus ahela võib teisendada ühefaasiliseks ahelaks, kujutamaks ferroresonantsahelat küllaltki täpselt. Graafiliselt tekib trafo magnetkarakteristikule kolm tööpunkti, kus punktile 1 vastab stabiilne normaaltalitus, punktile 2 vastab stabiilne ferroresonantsilek ning punkt 3 on ebastabiilne punkt, mida ei saa tekkida. Lineaarse ahela analüüs keskendub maksimaalse mahtuvustakistuse suuruse otsimisele, mis on lubatud antud trafo magnetkarakteristiku mitteküllastuse juures, mis piiraks mahtuvuspinget mõnele kindlale maksimaalsele lubatud suurusele. Analüüsi käigus tekivad erinevad tööpunktid, kus punktid 1 ja 3 on võimalikud stabiilsed punktid ning punkt 2 on ebastabiilne. Magnetkarakteristiku kaksikoleku analüüsil vaadeldakse ferroresonantsahelat ahelana, mis võngub kahe seisundi vahel (küllastunud ja mitteküllastunud seisund).

Ferroresonantsi tekkimiseks peab ahel sisaldama mittelineaarset induktiivsust. Mittelineaarne induktiivsus tekib mähise ferromagnetilisest materjalist südamiku küllastumisel. Sellised mähised esinevad näiteks trafodel, generaatoritel, mootoritel, küllastusreaktoritel ja elektromagnetilistel pingetrafodel. Elektrisüsteemides on kõige tavalisemateks ferroresonantsi põhjustajateks faasi ja maa vahele ühendatud pingetrafod, keskpingevõrkudes harva ka pingetrafod faaside vahel. Ferroresonantsi sagedamini esinevad tunnused on suured püsiliigpinged, suured püsivoolud, pinge ja voolu siinuskuju suured moonutused, neutraali pingenihe, trafo kuumenemine tühijooksul, trafodes ja muudes mähistes esinev ebaharilik madal heli, elektriseadmete vigastused, voolutrafode primaarmähise purunemine samal ajal, kui sekundaarmähis on vigastamata ning kaitseseadmete vale rakendumine.

Kõige levinum soovitus ferroresonantsi vältimiseks on alati lülitada trafosid kasutades kolmefaasilisi seadmeid, et vältida jadamisi induktiiv/mahtuvuslikke ahelaid. Samuti soovitatakse pingestada trafosid kasutades lüliteid, mis asuvad kohe nende kõrval. Kui ahela peab trafolt sisse lülitama ühe faasi kaupa, tuleb avatud faasi mahtuvust piirata, mis tähendab, et piirata tuleb liini pikkust. Samuti, peab trafo sekundaarpoolel või paralleelselt mahtuvusega olema koormust, et summutada resonantsahel. Koormus sekundaarpoolel peab olema vaid mõni % nominaalkoormusest, et blokeerida ferroresonants.

Ferroresonantsi mõju vähendamiseks tuleb vältida ferroresonantsi soodustavaid projektilahendusi, lülitusoperatsioone ja võrgu konfiguratsiooni. Vältida tuleks trafo tööd koormamata olekus. Samuti tuleks vähendada süsteemi mahtuvust. Parandada pinge ebastabiilsust, muutes süsteemi talitusprotseduure. Võimalik on trafo modifikatsioon, mis suurendaks nimipinge ja küllastuspinge suhet, mille tulemusel tekib ferroresonantsolek harvemini ning sumbub ka kiiremini.

Ferroresonantsi summutamiseks kasutatakse erinevaid seadmeid nagu metalloksiidpiirik, lülitatav takisti, filterahel, küllastusreaktor ja posistor. Iga seade eraldi pole täielik lahendus ferroresonantsi summutamisel, seetõttu kasutatakse nende seadmete erinevaid kombinatsioone. Ferroresonantsahelat on võimalik ümberseadistada, vähendades mahtuvustakistuse väärtust, sundides ühe punkti tööle, milleks on normaaltalitus.

Trafo võimalus minna ferroresonantsolekusse on otseselt seotud võrgupingega, mida suurem pinge, seda rohkem on trafo aldis ferroresonantsile. Ferroresonantsi tekkevõimalus sõltub suuresti trafo ühendusviisist ja lülitamise järjekorrast.

Jõutrafode ferroresonants sõltub erinevatest süsteemi ja alajaama parameetritest. Suurbritannia kogemuse põhjal võib väita, et jõutrafad kogevad ferroresonantsi olekut ühel korral kümnest

väljalülitusest. Pingetrafode ferroresonantsist tingitud ülekuumenemine võib viia isolatsiooniriketeni. Induktiivsed pingetrafod pole varustatud ferroresonantsi tuvastamise vahenditega ning seetõttu võib ferroresonants jääda märkamata pikaks ajaks. Ferroresonantsi vältimiseks või summutamiseks induktiivsetes pingetrafodes, ühendatakse sekundaarmähisega summutustakistus  $R$  igale trafole. Kui pingetrafo omab kahte sekundaarmähist siis on soovitatav ühendada takistus avatud kolmnurga tertsiaalmähise terminalidele. Mahtuvuslikud pingetrafod omavad väga häid ferroresonantsi omadusi ning tootjad on sellest ka teadlikud. Seetõttu toodetakse trafosid, mis juba sisaldavad erinevaid ferroresonantsi summutamise komponente, mis on paigaldatud sekundaarpinge mähisele.

Ferroresonants võib tekkida ühisel ühendusel koormamata liini ja trafo vahel. Samuti võib ferroresonants tekkida, kui trafo mõlemad mähised on isoleeritud neutraaliga, pingetrafod on koormamata ja on lülitatud keskpingepoolle faaside ja maa vahele ning ühefaasiline lühis on kõrgepingepoolle.

Edaspidistes töödes võiks uurida mõnda reaalelu juhtumit, mis on leidnud aset Eesti elektrisüsteemis, kus arvatavasti võis olla tegemist ferroresonantsiga. Teostada võiks mudeli simulatsiooni PSCAD tarkvaraga, mis näitaks ferroresonantsi olemasolu.

Antud töö andis selge ülevaate erinevatest resonantside tüüpidest. Uuriti ferroresonantsnähtuse tekkimist soodustavaid tingimusi ning kirjeldati ferroresonantsi summutamise ja ärahoidmise võimalusi.

# Kirjandus

- [1] Ü. Treufeldt, Resonants Elektrivõrkudes, Tallinn: TTÜ elektroenergeetika instituut, 2013.
- [2] V. Valverde, G. Buigues, E. Fernandes, A. J. Mazon and I. Zamora, "Behavioral Patterns in Voltage Transformer for Ferroresonance Detection," *IEEE*, pp. 772-776, 2012.
- [3] M. V. Escudero, I. Dudurych and M. Redfem, "Understanding ferroresonance," in *Universities Power Engineering Conference*, Bristol, UK, 2004.
- [4] E. Price, "A Tutorial on Ferroresonance," in *40th Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, 2013.
- [5] J. Horak, "A Review of Ferroresonance," in *Protective Relay Engineers, 2004 57th Annual Conference*, College Station, TX, USA, 2004.
- [6] M. Sanaye-Pasand, A. Rezaei-Zare, H. Mohseni, S. Farhangi and R. Iravani, "Comparison of Performance of Various Ferroresonance Suppressing Methods in Inductive and Capacitive Voltage Transformers," *IEEE*, 2006.
- [7] B. P. Daay, "Ferroresonance destroys transformers," in *Southeastcon '91*, Williamsburg, VA, 1991.
- [8] E. Martínez, G. Antonova and M. Olguín, "Ferroresonance phenomenon in CFE, its origin and effects," in *ProRelay 2013*, 2013.
- [9] S. Hassan, M. Vaziri and S. Vadhva, "Review of Ferroresonance in Power Distribution Grids," *IEEE*, pp. 444-449, 2011.
- [10] M. Esmaili, M. Rostami and G. B. Gharehpetian, "The Effect of Various Types of DG Interconnection Transformer on Ferroresonance," *IEEE*, 2013.
- [11] M. Monadi, A. Luna, J. I. Candela, M. Fayezi-zadeh and P. Rodriguez, "Analysis of Ferroresonance Effects in Distribution Networks with Distributed Source Units," *IEEE*, pp. 1974-1980, 2013.
- [12] P. Boucherot, "Existence de deux régimes en ferrorésonnance," in *Revue Generale de L'Électrice*, 1920, pp. 827-828.



- [13] J. Bethenod, "Sur le transformateur et résonance," in *L'Eclairae Electrique*, 1907, pp. 289-296.
- [14] J. W. Butler and C. Concordia, "Analysis of series capacitor application," *AIEE*, pp. 975-988, 1937.
- [15] R. Rudenberg, *Transient Performance of Electric Power Systems*, New York, 1950.
- [16] C. Hayashi, *Nonlinear Oscillations in Physical Systems*, New York, 1964.
- [17] M. R. Iravani, A. K. S. Chaudhary, W. J. Giesbrecht, I. E. Hassan, A. J. F. Keri, K. C. Lee, J. A. Martinez, A. S. Morched, B. A. Mork, M. Parniani, A. Sharshar, D. Shirmohammadi, R. A. Walling and D. A. Woodford, "Modeling and Analysis Guidelines for Slow Transients—Part III: The Study of Ferroresonance," *IEEE*, pp. 255-266, 2000.
- [18] G. W. Swift, "Power transformer core behavior under transient conditions," *IEEE*, pp. 2206-2209, 1971.
- [19] D. C. Jiles and D. L. Atherton, "Theory of ferromagnetic hysteresis," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, pp. 48-60, 1986.
- [20] J. G. Frame, N. Mohan and T. Liu, "Hysteresis modeling in an electromagnetic transients program," *IEEE*, pp. 3403-3411, 1982.
- [21] R. H. Hopkins, "Ferroresonance during single-phase switching of 3-phase distribution transformer banks," *IEEE*, pp. 289-293, 1965.
- [22] D. R. Smith, S. R. Swanson and J. D. Borst, "Overvoltages with remotely-switched cable-fed grounded wye-wye transformers," *IEEE*, pp. 1843-1853, 1975.
- [23] C. M. Arturi, "Transient simulation and analysis of a five-limb generator step-up transformer following an out-of-phase synchronization," *IEEE*, pp. 196-207, 1991.
- [24] B. A. Mork, *Ferroresonance and chaos—Observation and simulation of ferroresonance in a five-legged core distribution transformer*, North Dakota State University, Ph.D. dissertation, 1992.
- [25] C. Kieny, "Application of bifurcation theory in studying and understanding the global behavior of a resonant electric power circuit," in *IEEE Summer Meeting, SM*, 1990.

- [26] B. A. Mork and D. L. Stuehm, "Application of nonlinear dynamics and chaos to ferroresonance in distribution systems," *IEEE*, pp. 1009-1017, 1994.
- [27] Y. K. Tong, "NGC Experience on Ferroresonance in Power Transformers and Voltage Transformers on HV Transmission Systems," in *Warning! Ferroresonance Can Damage Your Plant*, Glasgow, 1997.
- [28] G. Mokryani, M. R. Haghifam, H. Latafat, P. Aliparast and A. Abdollahy, "Analysis of Ferroresonance in a 20kV Distribution Network," in *2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System*, Shenzhen, 2009.
- [29] Y. Li, W. Shi, R. Qin and J. Yang, "A Systematical Method for Suppressing Ferroresonance at Neutral-Grounded Substations," *IEEE*, pp. 1009-1015, 2003.
- [30] P. Ferracci, Cahier technique no. 190 - Ferroresonance, Schneider Electric, 1998.
- [31] D. A. N. Jacobson, D. R. Swatek and M. R. W, "Mitigating Potential Transformer Ferroresonance in a 230kV Converter Station," *IEEE*, pp. 359-365, 1997.
- [32] N. Janssens, V. Vanderstockt, H. Denoel and P. A. Monflis, "Elimination of Temporary Overvoltages due to Ferroresonance of Voltage Transformers," in *CIGRE*, 1990.
- [33] P. Bornard, V. Collet Billon and C. Kieny, "Protection of EHV Power Systems against Ferroresonance," in *CIGRE*, 1990.
- [34] Y. Yamagata, S. Nishiwaki, T. Koshizuka and N. Takahashi, "Ferroresonance by Open-Phase on Transformer with Delta Winding and Grounded Neutral," *IEEE*, pp. 292-297, 2002.
- [35] D. A. N. Jacobson, "Examples of Ferroresonance in a High Voltage Power System," *IEEE*, pp. 1206-1212, 2003.
- [36] Z. Emin, D. W. Auckland, Y. Tong and B. Zahawi, "Ferroresonance in electromagnetic voltage transformers: A study on nonlinear dynamics," *IEEE*, pp. 383-388, 1997.
- [37] M. Graovac, R. Iravani, X. Wang and D. R. McTaggart, "Fast Ferroresonance Suppression of Coupling Capacitor Voltage Transformers," *IEEE*, pp. 158-164, 2003.
- [38] M. Sanaye-Pasand, R. Aghazadeh and H. Mohseni, "Ferroresonance Occurrence During Energization of Capacitive Voltage Substations," *IEEE*, pp. 601-607, 2003.

- [39] R. Aghazadeh and M. Sanaye-Pasand, "Damping of capacitive voltage substations ferroresonance using a suitable RLC filter," *IEEE*, pp. 721-728, 2004.