

Óbudai Egyetem

Kandó Kálmán Villamosmérnöki kar



SZAKDOLGOZAT

Hallgató neve: Balogh Géza

Neptun kódja: XZWSXB

Hallgató törzskönyvi száma: T003717/FI12904/K

Budapest, 2022

**ÓBUDAI EGYETEM KANDÓ KÁLMÁN VILLAMOSMÉRNÖKI KAR
VILLAMOSENERGETIKA SZAKIRÁNY
NAPPALI TAGOZAT**

TRANSZFORMÁTOROK BEKAPCSOLÁSI ÁRAMLÖKÉSÉT SZÁMÍTÓ SZOFTVER KÉSZÍTÉSE

**Making a switching current impulse calculator
software for transformers.**

Intézeti konzulens:
Dr. Morva György
egyetemi tanár

Külső konzulens
Dr. Nádor Gábor
Kutatás-fejlesztési vezető

Készítette:
Balogh Géza
villamosmérnök hallgató

**BUDAPEST
2022**



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Villamosenergetikai Tanszék

SZAKDOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Balogh Géza

Szaktervezésszáma: SZD2210041045004658XZWSXB

Törzskönyviszáma: T003717/FI12904/K

Neptun kódja: XZWSXB

Szak: villamosmérnöki (magyar nyelven)

Specializáció: Villamosenergetikai specializáció

A dolgozat címe: Transzformátorok bekapcsolási áramlökéését számító szoftver készítése.

A dolgozat címe angolul: Making a switching current impulse calculator software for transformers.

- A feladat részletezése:**
1. Irodalomkutatás, a jelenség megismerése.
 2. Különböző kompenzálásra alkalmas módszerek összehasonlítása.
 3. Egyszerű számítógépes program írása, mely kiszámolja az áramlökések maximumát.
 4. Program lehetőség szerinti finomhangolása, működésének ellenőrzése

Intézményi konzulens neve: Morva György Ádám

A kiadott téma elévülési határideje: -

Beadási határidő: 2022. 12. 15.

A szakdolgozat: Nem titkos.

Kiadva: Budapest, 2022. 10. 04.

P.H

.....
Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom:

.....
belső konzulens

.....
külső konzulens

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott Balogh Géza kijelentem, hogy a szakdolgozat saját munkám eredménye, a felhasznált szakirodalmat és eszközöket azonosíthatóan közöltem. Az elkészült szakdolgozatban található eredményeket az egyetem és a feladatot kiíró intézmény saját céljára térítés nélkül felhasználhatja, a titkosításra vonatkozó esetleges megkötések mellett.

Budapest, 2022. december 14.

Balogh Géza
.....

Hallgató aláírása

Tartalomjegyzék

Bevezetés	6
1. A transzformátor	7
1.1. A transzformátor története	7
1.2. A transzformátor felépítése, működése	9
1.3. A transzformátor fontosabb tulajdonságai	11
2. Bekapcsolási áramlökés	15
2.1. A jelenség ismertetése	15
2.2. VER-re gyakorolt hatása.....	17
2.3. Csillapítási lehetőségek	19
3. A bekapcsolási áramlökést számító szoftver	20
3.1. A program működésének ismertetése	20
3.2. A használt számítási elmélet.....	21
3.2.1. Egyfázisú transzformátor.....	21
3.2.2. Ha a bekapcsolási szög nem nulla	25
3.2.3. Kapcsolási csoportok figyelembevétele háromfázisú transzformátorok esetén .	27
3.3. Programkódban való megvalósítás	34
3.4. Transzformátoron mért eredmények kiértékelése.....	38
3.4.1. Bekapcsolás remanencia nélkül.....	38
3.4.2. Bekapcsolás remanenciával.....	42
3.4.3. Negatív nagyságú tüskék, félperiódusok	45
4. A rövidzárási feszültség és a bekapcsolási áramlökés közötti összefüggések	49
5. Összefoglalás	54
6. Summary	55
7. Ábrajegyzék	56
Felhasznált irodalom.....	58

Bevezetés

A mindennapi életünket mára már teljesen meghatározzák az elektromos készülékek, és ebből adódóan az elektromos áram. Mikor az elektromos eszközeinket használjuk, legyen az egy számítógép, egy LED fénysor, vagy egy mikrohullámú sütő, mindegyikük működéséhez különböző feszültségek és áramok szükségesek. Ezeket a feszültség és áramszinteket transzformátorokkal állítják elő, melyet aztán igény szerint felhasználhatunk: egyenirányíthatjuk, szabályozhatjuk, vagy közvetlenül megtáplálhatjuk vele a fogyasztót. A háztartási eszközökön kívül azonban rengeteg más fogyasztó is létezik. A gyárakban található gépek nagyságrendekkel több energiát fogyasztanak háztartási berendezéseinknél, ráadásul ezek jóval nagyobb feszültségen is működhetnek, ezért itt is biztosítani kell a megfelelő betáplálást, amit ugyancsak transzformátorokkal biztosítanak. A villamosenergia rendszerben a gazdaságos energiaszállításhoz szintén szükséges a generátorokénál, illetve a fogyasztókénál magasabb feszültség szint biztosítása, amelyet transzformátorállomásokon hoznak létre. Elmondható tehát, hogy a transzformátor az elektromosság területén, de főleg annak az energetikai ágán az egyik legfontosabb elem, mely szükséges a berendezések működésétől kezdve az energiatovábbításig szinte mindenhol.

A szakdolgozatomban egy, a transzformátorokra jellemző jelenséggel, a bekapcsolási áramlökéssel foglalkozom. Az áramlökés kihat az energiahálózatra, és zavart kelthet az ott létesített védelmekben, így fontos, hogy tisztában legyünk a folyamat paramétereivel. Mivel egy transzformátorokat gyártó cégnél vagyok gyakornok, a tervezés során fontos meghatározni a transzformátor bekapcsolási áramát, ezért döntöttem ezen téma mellett. A munkahelyen használt szoftver nincs fejlesztve, így az újabb operációs rendszereken már nem működik megfelelően. Ezen okból a szakdolgozat projektjeként egy új szoftver létrehozását terveztem, mely korszerű operációs rendszereken is gond nélkül számol.

Ebben a dolgozatban a nagyteljesítményű, MVA nagyságrendbe tartozó transzformátorokról lesz szó.

1. A transzformátor

A transzformátor egy olyan áramköri elem, mely képes teljesítményátvitelre a bemenete és kimenete között, váltakozó feszültség mellett. A legfontosabb jellemzője, hogy a bemenetére adott feszültséget a kimenetén - áttételtől függően - visszakaphatjuk nagyobb vagy kisebb értékben is, de ugyanakkora teljesítménnyel. Ez azt jelenti, hogy azonos bemenő paraméterek esetén az kimeneti feszültség áttétellel való csökkentésével nagyobb áramot, míg növelésével kisebb áramot vehetünk le a kimenetről.

1.1. A transzformátor története

Az első kísérletek Faraday nevéhez fűződnek, aki az 1800-as évek első felében egy zárt vasmagra tekert vezetőkből képzett primer és szekunder tekercseket, majd egyenáramot vezetett bele. Megfigyelte, hogy feszültségimpulzus keletkezik a szekunder tekercs kapcsai közt. 1865-ben egy fizikus, James Clerk Maxwell publikált egy elméletet, melyben lefektette a gerjesztési és indukciótörvényeket, ezzel leírva a transzformátorok működési elvét. Az első transzformátor megalkotása 3 magyar feltaláló nevéhez fűződik: Déri Miksa, Bláthy Ottó és Zipernowsky Károly. Az általuk kidolgozott tervek alapján gyártották le az első zárt vasmagú transzformátort 1885-ben, majd a találmányt több országban sikerült szabadalmaztatniuk. [1]



1. ábra: Az első legyártott zárt vasmagú transzformátor

Ez egy egyfázisú transzformátor volt, mely 40 Hz-en működött, 1200VA teljesítményű, valamint 120/72V volt a feszültségátvétele. A háromfázisú transzformátort 5 évvel később - kb.

egyidőben az olajhűtésű transzformátorok kifejlesztésével – szabadalmaztatták. Az idő múlásával egyre nőtt a transzformátorok teljesítménye, valamint a feszültsége, és ezzel együtt a szigetelési távolságok növekedése miatt a méreteik is növekedni kezdtek. Napjainkban a legnagyobb transzformátorok már 1GVA feletti teljesítményt tudnak akár 1200 kV feszültségen. Mindez azért lehetséges, mert megjelentek új technológiák: Pontosabb számítási módszerek, jobb vasanyagok, kisebb járulékos veszteségű vezető típusok, valamint a megmunkálási minőség is rengeteget javult. A mai legnagyobb kihívások a transzformátorok tervezésénél a méret, valamint a veszteségek csökkentése, melyek a teljesítmény és a feszültség növekedésével együtt nőnek. Sajnos a két tényező fordítottan arányos egymással, így a kis veszteségű transzformátorhoz nagy méretek társulnak, a méret pedig befolyásolja a szállíthatóságát. A 4-5 méternél magasabb és 400 tonnánál nehezebb transzformátorokat nagyon körülményes a helyszínre szállítani az út vagy vasúthálózat (főleg a hidak) miatt. [1]

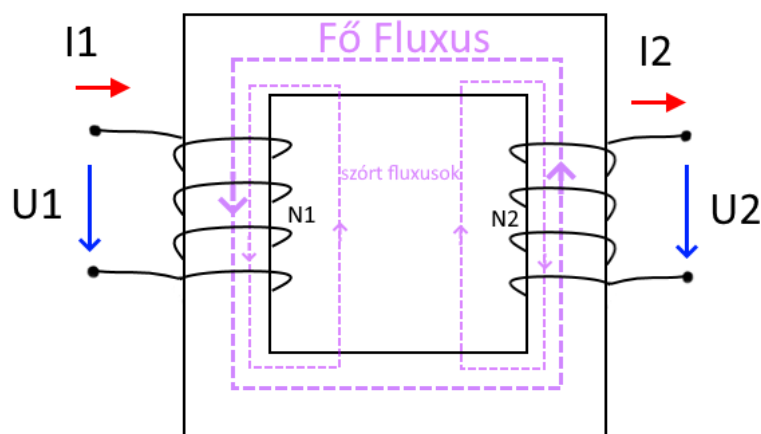


2. ábra: Ganz gyártmányú indiai transzformátor

A képen egy 765 kV/420 kV/33 kV-os 500 MVA névleges teljesítményű egyfázisú transzformátor látható, melyet Indiából rendeltek. A három egyfázisú egységből álló transzformátorcsoport együttesen 1500MVA teljesítményre képes. Figyelemre méltó a transzformátor mellett található radiátorcsoport is, melyet a transzformátortól külön helyeztek el, mérete pedig vetekedik a transzformátorral.

1.2. A transzformátor felépítése, működése

A transzformátor két legfőbb része a vasmag és a tekercsek. Legegyszerűbb esetben két tekercs van, amelyek a vasmagra tekercselve helyezkednek el. A két tekercs közül primernek hívják a bemeneti oldalon található, és szekundernek a kimeneti oldalon található tekercset. A primer tekercsbe vezetett áram mágneses erővonalakat hoz létre, amelyek a vasmagban mágneses fluxust indítanak meg. Ha a primer tekercsbe vezetett áram váltakozó áram, akkor a vasmagban kialakuló fluxus is változni fog az időben, így a szekunder oldalon levő tekercsben feszültséget fog indukálni. Az indukált feszültség nagysága függ a két tekercs menetszámától.



3. ábra: A transzformátor elvi felépítése

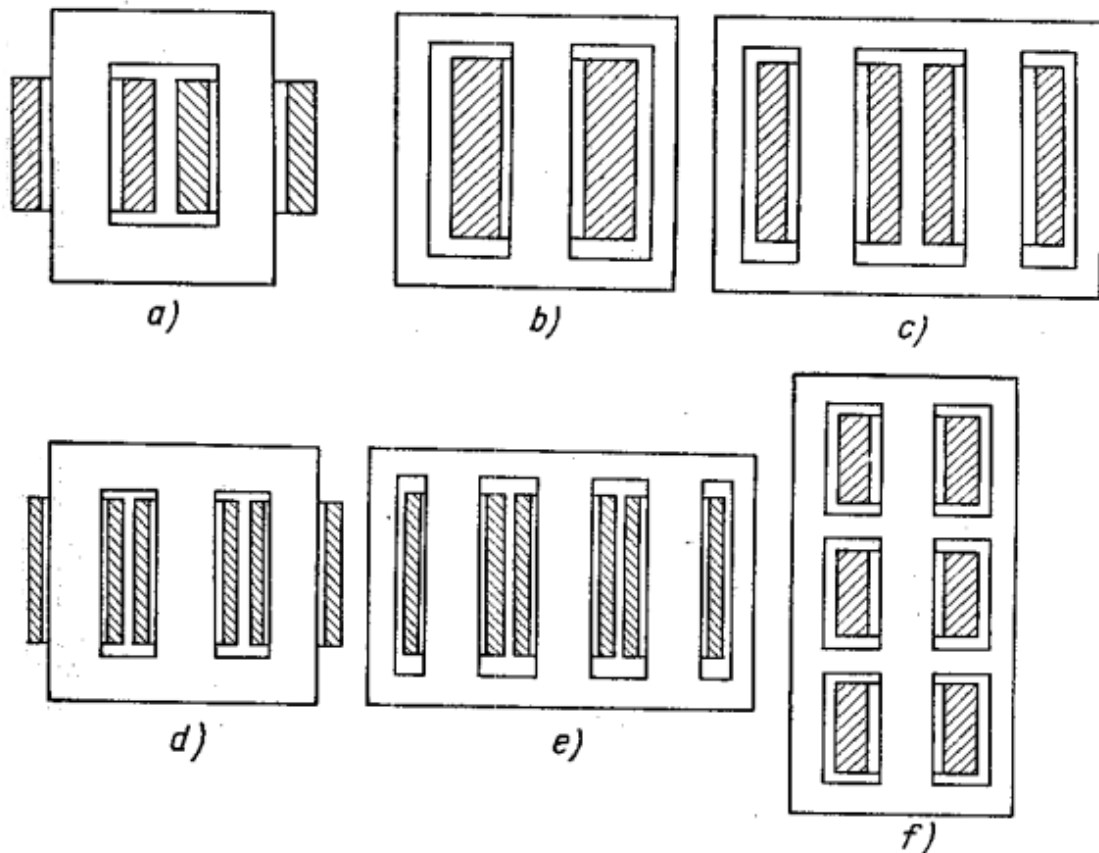
A gerjesztőáram által létrehozott fluxus záródhat a vasmagban, illetve a vasmagon kívül. A fluxus vasmagban záródó, és mindkét tekercssel kapcsolódó részét főfluxusnak, a vasmagon kívül záródó részét szórt fluxusnak nevezzük. Szó volt arról, hogy a transzformátor teljesítményátvitelre képes, valamint a feszültségátvitel menetszámtól függ. Ha $P_1=P_2$, akkor a következő összefüggések érvényesek:

$$U_1 * I_1 = U_2 * I_2$$

$$\frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2}$$

A nagytranszformátorok esetén a tekercsek elrendezése kicsit különböző az előbbi képhez képest. A tekercsüket ugyanis a jobb mágneses kapcsolódás érdekében a vasmag egy oszlopára helyezik, mégpedig úgy, hogy a kisfeszültségű oldal van a vasmaghoz a legközelebb, míg a nagyobb feszültségű van kívül. Három fázis esetén a vasmag általában három oszlopból áll, itt

az egyes fázisok megfelelő tekercsei külön oszlopokra vannak gombolyítva. A vasmag azon részét, amelyet tekercs körbevesz oszlopnak, amit pedig nem, járomnak nevezünk. Egy transzformátorba terciér, valamint szabályozótekercs is kaphat helyet, melyek közül a terciért szokták belülré helyezni a feszültség szintje miatt, a szabályozót kívülré a sok kivezetése miatt.



4. ábra: Vasmagtípusok

A 4. ábrán transzformátorok vasmagjának típusai láthatók. A felső sorban (a, b, c) egyfázisú transzformátorok vasmagjai, az alsó sorban (d, e, f) 3 fázisú transzformátorok vasmagjai vannak ábrázolva. Az egyfázisú transzformátorok lehetnek egy vagy két tekercselésűek. Egy tekercselés esetén (b) a primer és szekunder tekercs koncentrikusan egymásra van építve, két tekercselés esetén (a, c) hasonló a tekercsek felépítése, viszont itt a szükséges menetszámok felét az egyik oszlopra, felét a másik oszlopra gombolyítják. Három fázis esetén megkülönböztetünk mag típusú (d, e) és köpeny típusú (f) vasmagot. Mag típus esetén a tekercselés veszi körbe a magot, köpeny típus esetén pedig a mag veszi körbe a tekercseket.

A háromfázisú mag típus széleskörűen elterjedt, melynek két típusa van, a háromoszlopos (d) és az ötoszlopos (e). Az ötoszlopos előnyösebb lehet nagyobb teljesítményű transzformátorok

esetén, mivel a két szélső oszlop miatt alacsonyabbak lehetnek a jármók. Nagyon nagy transzformátorokat köpeny típussal, valamint három különálló egyfázisú egységből gyártanak, ugyanis itt a három fázis külön szállíthatók egymástól. [1]

1.3. A transzformátor fontosabb tulajdonságai

Egy transzformátor legfontosabb paramétere a névleges teljesítménye. A névleges teljesítmény az a teljesítmény, melyet úgy határoznak meg, hogy üzemszerűen ekkora teljesítmény átvitelére legyen képes. Mivel üzembiztosnak kell lenni az elosztóhálózatoknak, egy ország energiarendszerében az összesített transzformátorteljesítmény többszöröse a beépített generátorok teljesítményének. Lakossági fogyasztók esetében egy utcára vagy háztömbre 1 MVA, panelházas lakótelepeken vagy kis ipari fogyasztóknál pedig 2-3 MVA a tipikus transzformátorteljesítmény. Nagyobb ipari létesítmények rendelkezhetnek külön alállomással, melyekhez több 10 MVA, nagy multinacionális gyáraknál, illetve az elosztóhálózaton pedig akár a több 100 MVA sem ritka. Jele: S_n

A transzformátorok másik legfőbb paramétere a primer és szekunderoldali feszültség. Lakossági fogyasztók esetén ez általában középfeszültség/kisfeszültség, pl. 11/0,4 kV. Ezeket a transzformátorokat step-down transzformátornak hívják, mivel úgy tervezték őket, hogy a feszültséget letranszformálják. Az erőművek alállomásain középfeszültség/nagyfeszültség található, pl. 15/120 kV. Az erőművek generátorai tipikusan 10-20-kV körül állítják elő a villamos energiát, de mivel ez az energia távol kerül felhasználásra, ezért ezt előbb a gazdaságos szállítás érdekében feltranszformálják nagyfeszültségre. Ezeket a transzformátorokat hívják step-up transzformátoroknak.

A harmadik fontos paraméter a kapcsolási csoport. A felhasználás céljától függően változhatnak a kapcsolási csoportok. Az alállomási transzformátoroknál a földelt csillag/delta vagy a földelt csillag/csillag/tercier a leggyakrabban elterjedt. A nagyfeszültségű oldalt nagy betű, a kisfeszültségű oldalt kis betűvel jelöljük. Jelentősége a zérussorrendű áramok kezelése miatt, illetve a zárlati tényezők javítása miatt van. Ezen kívül a kapcsolási csoporthoz tartozik egy szám is, mely a transzformátor fázisforgató hatását szemlélteti egy óra lapjának megfelelően. Példa: földelt csillag/delta 11 órás (330 fokos) forgatással: YNd11. További példákat láthatunk a következő ábrán:

Kapcsolási csoport jele	Vektorábra		Kapcsolási vázlat	
	nagyfeszültségű oldal	kisfeszültségű oldal	nagyfeszültségű oldal	kisfeszültségű oldal
D d 0				
Y y 0				
D z 0				

5. ábra: 0 órás kapcsolási csoportok

A transzformátorral kapcsolatos számolásoknál további tényezőket határozunk meg. Közülük az egyik legfontosabb a százalékos rövidzárási feszültség vagy impedancia, más néven a drop. Amikor egy transzformátort terhelünk, akkor a szekunder oldalon folyó árammal arányosan nő a primer oldali tekercseléseiben folyó áram is. Akkor lesz a legnagyobb a primer oldali áram, amikor a szekunder oldal tekercselését impedanciamentesen összekötjük, azaz rövidre zárjuk. Azt a primer oldali feszültséget, amely ezen a rövidre zárt transzformátoron képes áthajtani a transzformátor névleges áramát, rövidzárási feszültségnek nevezzük. A rövidzárási feszültség és a transzformátor névleges primer oldali feszültségének a hányadosa százalékban kifejezve a drop, amelyet a

$$\varepsilon_s = 2\pi f * \mu_0 * \frac{l_k * \left(\delta_{fsz} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right)}{h_t * U_{menet}^2} * \frac{S_n}{3}$$

összefüggés alapján tudunk számolni, ahol:

μ_0 : vákuum permeabilitása,

l_k : dropcsatorna közepes hossza,

δ_{fsz} : a főszigetelés vastagsága,

a_1 és a_2 : tekercsek szélességei,

h_t : tekercs magassága.

A képletből látszik, hogy a drop sok mindentől függ, azonban egy transzformátor tervezése során a menetfeszültséggel, valamint a tekercsek geometriai méreteivel tudjuk befolyásolni. A drop nagyban befolyásolja a maximális zárlati áramot is. A kis transzformátorok dropja tipikusan 5%, a nagyobbaké 10% körül van. A nagyobb transzformátorokat gyakran gyártják emelt droppal, hogy a zárlati áramukat lekorlátozzák. Ezeknek a dropja akár 16% is lehet.

Az előbb leírtakban szó volt, hogy a transzformátor teljesítményátvitelre képes. Ez az átvitel azonban nem ideális, többféle veszteség is fellép az átvitel során. Üresjárás esetén lényeges veszteségek közé tartozik a vasmag hiszterézis vesztesége, valamint az örvényáram vesztesége. Az előbbi a vasmagban a fluxus irányának változása okozta átmágneseződések miatt következik be, az utóbbi pedig a vasmagban indukálódó örvényáramok miatt. Terheléses esetben az előzőek mellé társul még az előbb elhanyagolt $I^2 \cdot R$ tekercs ellenállásából adódó veszteség, a nem vasmagban záródó váltakozó szórt fluxus által a tekercsekben okozott áramkiszorulási (szkin) veszteség, és a transzformátor vasszerkezetében való záródása miatt létrejövő örvényáramok keltette veszteség. Az örvényáramok elkerülése miatt a vasmagot több, 0,2-0,3mm vastag lemezből rakják össze, melyek elszigeteltek egymástól. A szekrényben folyó örvényáramokat okozta veszteségeket úgynevezett fluxuscspadázással csökkentik, amely a vasmaghoz hasonlóan lemezelt borítást jelent a transzformátorszekrény belső falán, amiben a fluxus záródhat.

A veszteségek, főleg terheléskor jelentős hőfejlődéssel járnak a transzformátorban. Ezt a hőt olyan olajjal vezetik el a tekercsektől, mely egyben szigetelőanyagként is szolgál. A transzformátor vasmagjában, valamint a tekercsek között olajcsatornákat biztosítanak, ahol az olaj a transzformátor típusától függően vagy melegedés okozta termoszifon hatás miatt áramlik, vagy szivattyúkkal keringtetik. Az olajat nagyméretű radiátorokba vezetik, amelyre akár ventilátorokat is szerelhetnek. A különböző hűtési módok között elterjedt még a vízűtés is, ahol radiátorok helyett hőcserélőkbe vezetik az olajat, majd víznek adják át a generált hőmennyiséget.

Az energiahálózat igénybevételének növekedése, valamint az urbanizáció szükségessé tette alállomások létesítését, melyek lakóépületek közelében vannak. Ez viszont hamar meghozta komoly mellékhatását: a zajt. A transzformátor működése során több forrásból ad ki hangokat. Az egyik legnagyobb problémát a ventilátorok által produkált zaj okozza, azonban emellett még a transzformátor működése során fellépő magnetostrikció is hozzájárul a zajterheléshez. Gyakran úgy rendelnek transzformátort, hogy meghatározzák a maximális zajterhelést, melyet

még akár telepítés után le is mérhetnek. Zaj csökkentésére a vasmagot elasztikus talpakra helyezik a szekrényben, de az indukció, illetve a tekercsek áramsűrűségének csökkentésével is enyhíthető a transzformátor zaja. Ventilátorok esetén a gyártó határoz meg zajszinteket, amelyekkel számolhatunk, továbbá a radiátorok kialakításával is más-más eredményeket kaphatunk. A ventilátorok számának csökkentése, valamint a zajvédő burkolat is javíthat a helyzeten, itt viszont fokozottan figyelni kell, hogy a hűtési teljesítmény elégséges legyen. A transzformátor eredő zaját dB-ben határozzák meg több mérésben a transzformátortól megadott távolságra. Az eredő zajokat hangszigetelő fallal lehet tompítani.

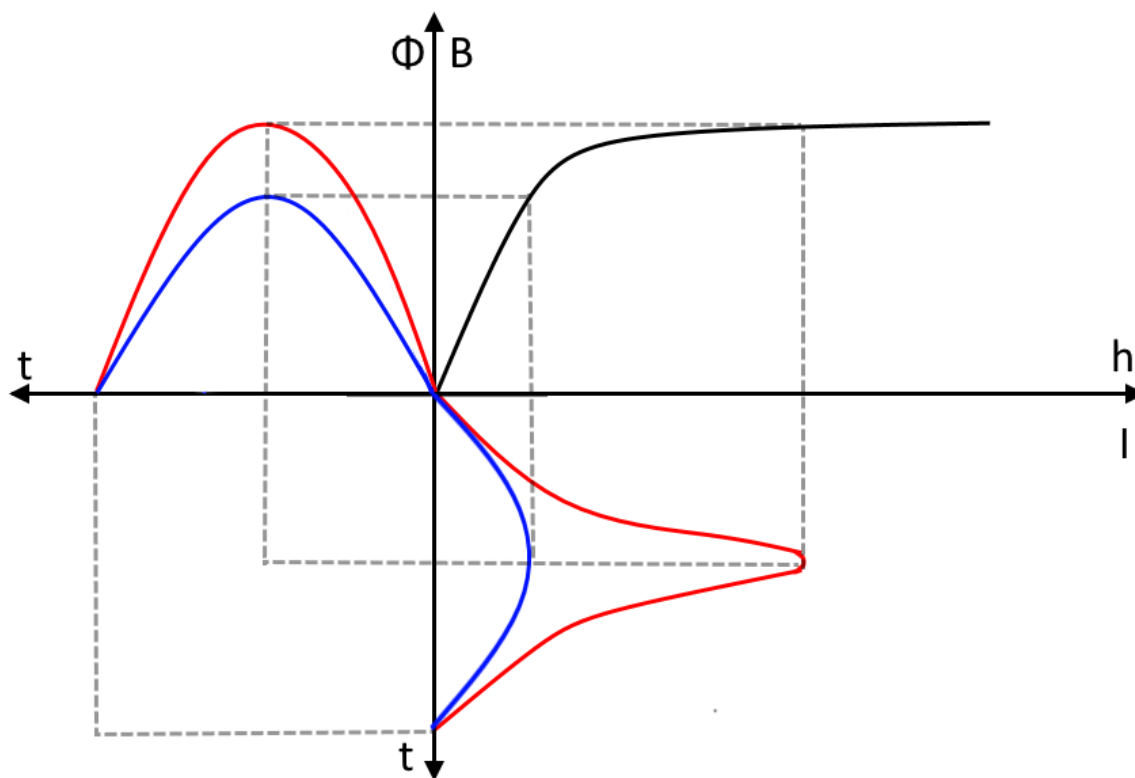
A transzformátor az energiaátviteli rendszer legdrágább láncszeme, emiatt óvni kell a különböző behatásoktól, mint például a zárlatok, vagy a túlfeszültségek. Túlfeszültségek ellen az átvezetőkön koordináló szikraközöket helyeznek el, amely egy esetleges villámcsapás esetén átüt, ezzel megakadályozva a transzformátor meghibásodását. A zárlatok ellen többféle védelemmel találkozhatunk: Túlterhelés védelem, Buchholz-relé, robbanószelepek, differenciál védelmek. Az alállomásokon további védelmek vannak elhelyezve, hogy egy esetleges hiba esetén minél kisebb eséllyel következzen be anyagi kár. Ezek a védelmek önmagukban nem elégségesek egy zárlat esetén, ugyanis a megszakítók kioldási idővel rendelkeznek. A tekercsekre és a transzformátor belső szerkezetére folyamatos erő hat működés közben, amit az erre a célra létesített faszerkezet tart stabilan. Ezen erők zárlat esetén többszázszorosára nőhetnek, ami deformációkat okozhat a tekercsekben. A hőmérséklet is ugrásszerűen növekszik, ugyanis a leadott energia az áram négyzetével arányos, ezért az energiaátviteli transzformátorokat mindig úgy kell tervezni, hogy a zárlati igénybevételek maradandó károsodást ne okozhassanak bennük. [1]

2. A bekapcsolási áramlökés

Legyen szó egy háztartási eszközről vagy egy munkagépről, köztudott, hogy mikor bekapcsolunk egy berendezést, akkor az egy rövid ideig nagyobb áramot vesz fel a névleges áramánál. Ez a transzformátoroknál sincs másképp: A transzformátor bekapcsolási áramlökése egy olyan jelenség, amely akkor jön létre, mikor a transzformátort nyitott szekunder oldal mellett feszültség alá helyezzük, vagyis a hálózatra kapcsoljuk. Nagy áramról van szó, nagysága függ a transzformátor típusától, felépítésétől, a bekapcsolási szögtől, az előző kikapcsoláskor bent maradt remanens indukciótól, valamint a hőmérséklettől. Szélsőséges esetben a névleges áram 7-szerese, de rossz tervezés esetén akár 40-szerese is lehet, viszonylag hosszú ideig, akár 5-7 másodpercig is tarthat, közbe azonban csillapodik. Gondos tervezés esetén olyan igénybevételeket, mint a zárlat nem okoz, mert még a legkedvezőtlenebb esetben is kisebb értékű egy zárlatnál. Ennek ellenére ez egy nemkívánatos jelenség, mert zavart kelthet a transzformátor védelmeiben, ezért igyekszünk csökkenteni, hogy ne lépjenek működésbe ilyenkor a védelmek.

2.1. A jelenség ismertetése

A bekapcsolási áramlökés oka, bekapcsolás után az előző kikapcsoláskor bent maradt remanens indukció szintjéről kezdődik a mágneses tér felépülése. Ez függ kikapcsoláskor a feszültség fázishelyzetétől, és legrosszabb esetben 0,8-szorosa a transzformátor névleges indukciójának. Mivel két fázisban azonos a remanencia iránya és a harmadikban ellentétes, mindig lesz egy olyan fázis, ahol bekapcsolásnál a rákapcsolt feszültség kedvezőtlen irányba gerjeszti tovább a vasmagot. Mivel a vas mágnesezési görbéje nem lineáris, a vasmag betelít és a telített vasmagra tekert tekercs közel légmagos tekercsként fog működni.



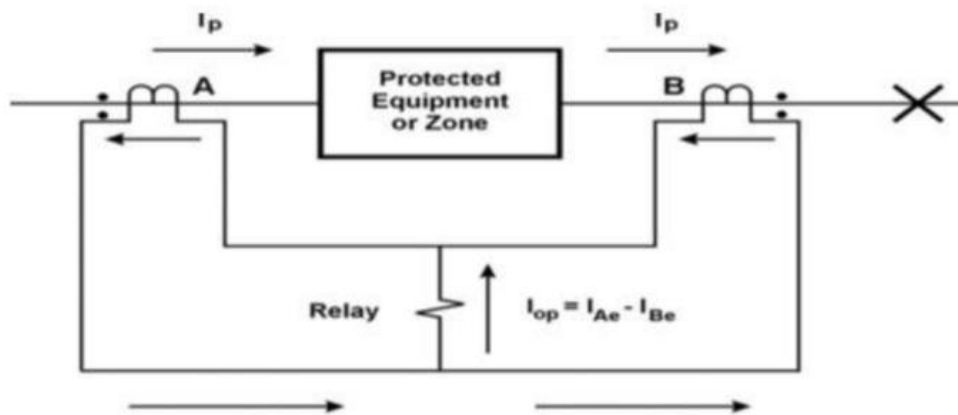
6. ábra: A bekapcsolási áramlökés oka

A fenti ábrán látható, jobb felső síknegyedben a vasmag mágnesezési görbéje látható. Ahogy a görbén látszik, van neki egy viszonylag lineáris része, és van egy elsimuló része. Normál üzemi állapotban a kék görbével jelölt, eset áll fenn. Bal felül a vasmag fluxusa látható, mely időben szinuszosan változik, jobb alul pedig az áram. Mindaddig, míg a vasmag a telítési szakaszba nem ér, az áram közel lineárisan követi a fluxus jelalakját. Mikor a vasmag betelít, a helyzet megváltozik. Piros esetben a telítési görbe nemlinearitása miatt az áram csúcsértéke drasztikusan növekszik a fluxus akár kismértékű növekedésére is. Ehhez az áramlökéshez még egy DC komponens is társul, ugyanis a tekercseken folyó áram a feszültséggel közel 90° szöget zár be. Legrosszabb esetben a feszültség nullátmenetben történik a kapcsolás, ilyenkor az áram éppen csúcsértéknél lenne. Mivel azonban az áram nem képes 0 idő alatt elérni a csúcsértéket - ami végtelen energiabefektetéssel járna - ezért egy DC komponens alakul ki, mely időben csillapodik. Ennek a két komponensnek az eredője lesz a bekapcsolási áramlökés. [2] [3]

2.2. VER-re gyakorolt hatása

Az áramlökés többszöröse – egyes források szerint 40-szerese is [2] - lehet a névleges áramnak. Ez a transzformátort dinamikusan erősen igénybe veszi, mely csökkentheti annak élettartamát, valamint a transzformátor védelmei is hibásan működhetnek miatta.

Egy példa erre a transzformátor különbozeti védelme. A transzformátor átvezető szigetelőin általában nyaki áramváltók találhatók, melyek a primer és szekunder oldal között differenciálvédelmet látnak el.



7. ábra: Differenciálvédelem működése

A védelem úgy működik, hogy méri két pont között a be és kifolyó áramot, és ha a kettő között jelentős különbség van, akkor feltételez zárlatot. A bekapcsolási áramlökés kizárólag a feszültségre rákapcsolt (primer) tekercsben jelentkezik, ezért a primer oldali áramváltó érzékeli az áramot, a szekunder nem, a védelem működésbe lép. A hibás kioldás ellen többféle módon védekezhetünk.

A védelmek beállításához először ismernünk kell az áramlökés sajátosságait. A bekapcsolási áramlökésre különösen jellemző, hogy DC összetevőt és különféle felharmonikusokat tartalmaz. Ezek közül a második felharmonikus aránya az idő múlásával növekszik. Ha van remanencia a vasmagban, akkor az áramlökés még negatív tüskéket, vagy félperiódusokat is produkálhat, melyek DC összetevőinek lecsengési időállandója jóval nagyobb, mint egy zárlat esetében. Az áramlökés általában kapcsolási műveletek során jön létre, azonban van pár kivétel: Mikor egy zárlati hiba elhárult, a zárlat helyéhez közel a feszültségletörés követte hirtelen potenciálemelkedés képes telítésbe taszítani a közeli transzformátorok vasmagjait. Párhuzamos üzem esetén egy transzformátor bekapcsolási árama miatt okozott feszültségletörés utáni

potenciálemelkedés is szintén okozhat a párhuzamosan járatott transzformátorokban áramlökést. Ezek általában kisebb erőművek vagy napelemes (PV) parkok transzformátorállomásain következnek be, ugyanis itt a generátor, vagy az inverter zárlati teljesítménye korlátozottabb az ellátóhálózathoz képest. Szélsőséges esetben a vasmag betelíthet a hálózatot ért villámcsapás során is.

Sem a villamosenergia-rendszer, sem a transzformátor szempontjából kedvező egy ilyen bekapcsolási áramlökés, ugyanis ahogy a transzformátor védelmekben, így a VER védelmeiben is zavarokat tud okozni a jelenség. A lökés a hálózaton kisebb feszültségeséseket, továbbá felharmonikusokat hoz létre, melyek rezonanciát is okozhatnak a rendszer elemeiben, túlfeszültségekhez, átütéshez, mechanikai sérülésekhez vezethet.

A transzformátorok védelmére szolgáló egyik megoldás, hogy a transzformátort például egy zárlatból adódó feszültségletörés érzékelése esetén azonnal leválasztja a hálózatról. Ennek előnye, hogy a transzformátor nem lesz kitéve a feszültségletörésből való visszatérés által okozott bekapcsolási áramlökésnek, visszakapcsoláskor viszont ügyelni kell a csillapított indításra, továbbá a megfelelő átkapcsolást is biztosítani kell az ellátás érdekében.

A bekapcsolási áramlökés során a védelmeket elhangolhatjuk, hogy ne okozzanak akaratlan működést. A védelmek elhangolására megoldás a felharmonikusok érzékelése. Mint már említésre került, a második felharmonikus a leggyakoribb harmonikus a bekapcsolás során. Ezt egy szűrővel kiszűrve megakadályozhatjuk a nem várt működést.

Ha a maximális áramlökés 7-szerese a névleges áramnak, akkor a védelmet állíthatjuk ezen érték fölé, ugyanis a zárlati áramok akár a névleges áram 50-szeresei is lehetnek. Ennek a módszernek a hátránya, hogy így a $7I_n$ alatti hibákat nem érzékeli a védelem. A védelmek pontos értékének beállítását próbálgatással oldhatjuk meg. Ehhez a védelmet beállítjuk egy értékre, bekapcsolunk. Ha a bekapcsolás kioldást eredményez, akkor állítunk a beállításokon, és újra bekapcsolunk.

A védelmek elhangolása helyett érdemes különböző technikákkal csökkenteni a bekapcsolási áramlökést, így azok nem okoznak hibás működést. [9]

2.3. Csillapítási lehetőségek

A bekapcsolási áram csökkentésére a legegyszerűbb módszer, hogy megvárjuk, míg a vasmag remanenciája optimális méretűre csökken. Ennek hátránya, hogy ez több percig, nagy transzformátoroknál akár órákig is tarthat, és nem szünteti meg az áramlökést teljes mértékben, csak csökkenti. Másik módszer a vezérelt bekapcsolás módszere. Lényege, hogy a bekapcsolási parancs kiadásakor a megszakító működtetése a bekapcsolás vezérlőn keresztül történik meg. A vezérlő szinkronizálja magát az aktuális feszültség fázishelyzetéhez, és úgy küldi a megszakítóra a bekapcsolási parancsot, hogy a kapcsolat pillanatában a legoptimálisabb fázishelyzet valósuljon meg. Alkalmazásához olyan megszakítót kell alkalmazni, melynek az működési idejének szórása alacsony, pontosan meghatározható. A modern vezérlők képesek fázisonként kiszámolni az optimális kapcsolási időt, ilyenkor az áramlökést érzékelni sem lehet. Ehhez azonban külön hajtású megszakítók szükségesek, melyek növelik a kiépítés költségét. Másik módszer a bekapcsolási áram csökkentésére indítóellenállások alkalmazása, mely csillag kapcsolású tekercsek csillagpontjába iktatható be a bekapcsolás időtartamára. Ez a módszer a vezérelt bekapcsolással együtt is alkalmazható. [3]

3. A bekapcsolási áramlökést számító szoftver

A projekt során a cél egy egyszerű bekapcsolási áramlökést számító program létrehozása volt. A szoftver kezelőfelülete egy HTML dokumentum, melyben a számítást JavaScript nyelven írt kód végzi. Az eredményeket megtekinthetjük egy számítás után legenerált grafikonon, amelyhez a Chart.js nevű JavaScript libraryt használtam fel. A szoftver kiszámolja a bekapcsolási áramlökés időfüggvényét a transzformátor egyik tekercsére a kapcsolási csoportnak megfelelően.

3.1. A program működésének ismertetése

A HTML dokumentum beviteli mezőket tartalmaz, és két gombot, „Számol” és „Betölt”. A „Betölt” gombra kattintva betölthetünk egy minta konfigurációt, melyben változtatva az értékeket, egyszerűen megfigyelhetjük a változásokat az áramlökésben.

TRANSZFORMÁTOR BEKAPCSOLÁSI ÁRAMLÖKÉS KALKULÁTOR

Transzformátor adatai: Hálózati adat: Időszak: 0s -

Névleges teljesítmény: kVA Hálózat ellenállása: Ohm

Frekvencia: Hz Hálózat induktivitása: H

Indukció: T Időszak végpontja: s

Remanencia: % Bn

Menetfeszültség: V << >>

Primer feszültség: kV

Bekapcsolási szög: fok

Kapcsolás:

Primer tekercs adatai:

Áramsűrűség: A/mm²

Belső átmérő: mm

Tekercselés redukált szélessége: mm

Tekercs mágneses magassága: mm

Tekercs hőmérséklete: C

Tekercs anyaga: Réz Alu

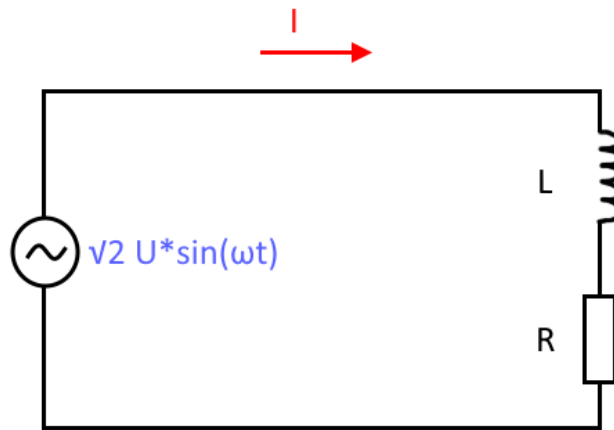
8. ábra: A program kezelőfelülete

A bekapcsolási jelenség számításánál figyelembe vehető a bekapcsoláskor fokozatosan változó vonali impedancia is, ami lehetővé teszi például egy hálózatba betápláló generátor tranzienis és szubtranzienis reakciójának a bekapcsolási áramra gyakorolt hatásának a figyelembevételét.

3.2. A használt számítási elmélet

3.2.1. Egyfázisú transzformátor

Képzeljünk el egy egyfázisú transzformátort:



9. ábra: Egyfázisú transzformátor tekercselése

Ez a transzformátor modellezhető egy nemlineáris L induktivitással és egy vele sorba kötött R ellenállással. Mivel a feszültség és az áram fázishelyzete között közel 90 fok az eltérés, a legkedvezőtlenebb pillanat akkor áll elő, mikor a feszültség éppen nulla. Az összefüggést a

$$\sqrt{2}U \cdot \sin(\omega t) = I \cdot R + N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

egyenlet írja le, ahol:

N : a vizsgált tekercs menetszáma

Φ : a vizsgált tekercs által körbezárt fluxus

Miután a Φ_m névleges fluxus kialakult, a kis üresjárási áramok annyira kicsik, hogy a fenti egyenletből az $I \cdot R$ tag elhanyagolható. A névleges fluxusamplitúdó ekkor a

$$\Phi_m = \frac{\sqrt{2}U}{\omega N} \quad (2)$$

képletel számolható. Az (1) egyenletet integrálva a

$$\Phi_m [1 - \cos(\omega t)] = \frac{1}{N} \int_0^t I \cdot R dt + \Phi - \Phi_r \quad (3)$$

összefüggést kapjuk. Φ_r a remanens fluxus $t=0$ időpontban. A tapasztalati értékek azt mutatják, hogy 45 fokos szögben vágott, hidegen hengerelt vasmaglemezek esetén, a bekapcsolást követő első periódus elején a vasmag egyik oszlopában kialakulni tudó remanens fluxus maximális értéke a névleges üzemi csúcsfluxus 80%-a lehet. A (2) egyenletből a

$$\Phi_r(1) = 0,8 * \frac{\sqrt{2}U_{menet}}{\omega} \quad (4)$$

összefüggéssel meghatározható remanens fluxus az első periódus elején. Miután az első periódus remanenciáját meghatároztuk, a (3) egyenletet használva az összes többi periódus elején meghatározható a remanens fluxus a

$$\Phi_r(n) = \Phi_r(n - 1) - \frac{1}{N} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} I * R dt \quad (5)$$

egyenlet segítségével. Mivel bekapcsolási áramlökések azért jön létre, mert a vasmag túltelítődik, ezért meg kell határozni azt az t_s időpontot, ahol ez a telítettség bekövetkezik. Amíg ezt a telítési pontot el nem éri a Φ fluxus, a transzformátor üresjárású állapotban van. Mivel az üresjárású áram jellemzően kisebb a névleges áram 1%-ánál, és a kialakuló áramcsúcs ennek sokszorososa lesz, ezért I elhanyagolható, míg a vasmag be nem telít. Ezzel a feltételezéssel, a (3) egyenlet integrálos tagja nulla, így az egyenletből származtatott

$$\theta_s(n) = \omega t_s(n) = \cos^{-1} \left[\frac{\Phi_m - \Phi_r(n) - \Phi_s}{\Phi_m} \right] \quad (6)$$

összefüggés alapján kiszámítható minden periódus elején az a $t_s(n)$ időpont, ahol a vasmag teljesen telítésbe nem kerül. Ettől az időponttól kezdve a 9. ábrán látható transzformátor primer tekercs légmagos induktivitásával tudunk számolni, melyhez a pontosabb számolás érdekében hozzáadhatjuk a hálózati induktivitást. Az áram kiszámításához szükségünk van az áram feszültséghez képesti fázishelyzetére. Ezt a

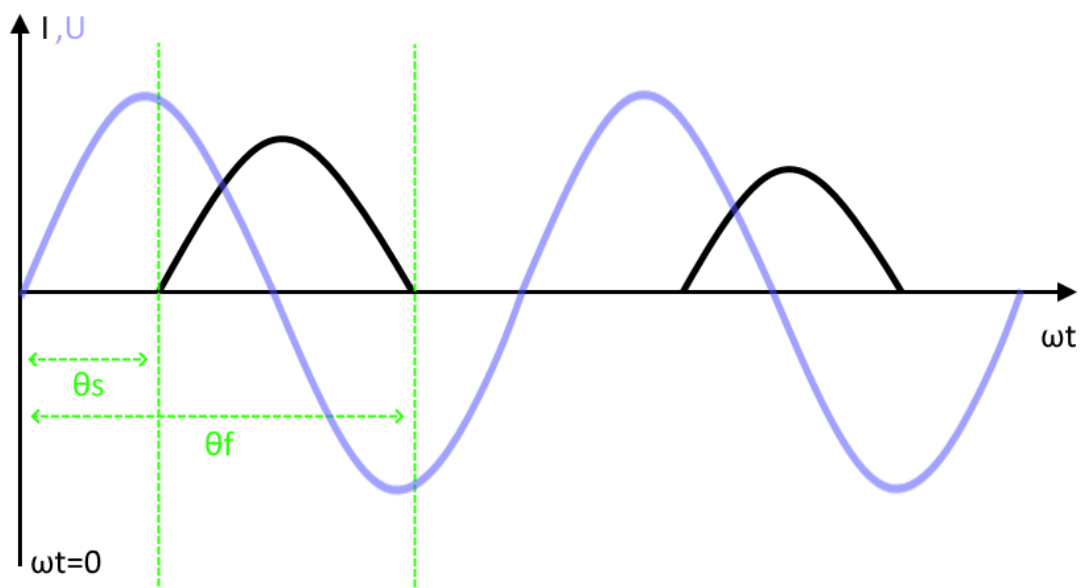
$$\psi = \sin^{-1} \left(\frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \right) \quad (7)$$

képlettel számolhatjuk ki.

Az első periódus áramának kiszámításához minden feltétel adott, ez a következőképpen számolható ki:

$$I(t) = \frac{\sqrt{2}U}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \left[\sin(\omega t - \Psi) - e^{-\frac{R}{L} \left[t - \frac{\theta_s(n)}{\omega} \right]} * \sin(\theta_s(n) - \Psi) \right] \quad (8)$$

Fontos megemlíteni, hogy az ezzel az összefüggéssel kiszámított áramértékek csak a telített vasmag mellett érvényesek. Amikor a vasmag nincs telítésben, akkor az áramot nullának kell tekinteni. A függvény kezdeti feltétele tehát $I=0$ amíg $t = \theta_s(n)$ időpillanatot el nem érjük. Az alábbi ábrán látható, hogy milyen jelalakot kapunk, ha ezekkel a feltételekkel alkalmazzuk a függvényt.



10. ábra: $U I$ függvény

Az (5) és (6) egyenletekből látható, hogy a remanens fluxust a periódusok elején számoljuk, így az egész periódus számítása során nem változik. Az első periódusban ezt a maradék fluxust megadtuk, hogy a névleges fluxus csúcsamplitúdójának 80%-a. A következő periódusokban a maradék fluxus értéke folyamatosan csökkenni fog, melyet a telítés $\theta_s(n)$ kezdeti időpontjából, valamint a telítésből való visszatérés $\theta_f(n)$ időpontjából számolhatunk ki minden periódus elején. $\theta_f(n)$ meghatározható a

$$\sin[\theta_f(n) - \Psi] - e^{-\frac{R}{\omega L} [\theta_f(n) - \theta_s(n)]} * \sin(\theta_s(n) - \Psi) = 0 \quad (9)$$

összefüggésből. Az egyenletből nem fejezhető ki matematikailag $\theta_f(n)$, ezért az eredményt iterációval tudjuk meghatározni. $\theta_s(n)$ és $\theta_f(n)$ ismeretével tudjuk az $I(t)$ függvény nullátmeneteit, ezáltal tudjuk az (5) egyenletben az integráláshoz szükséges határokat, melyek a következő periódusok remanens fluxusának meghatározásához szükségesek. Az (5) egyenletbe behelyettesítve a (8) áramfüggvényt a

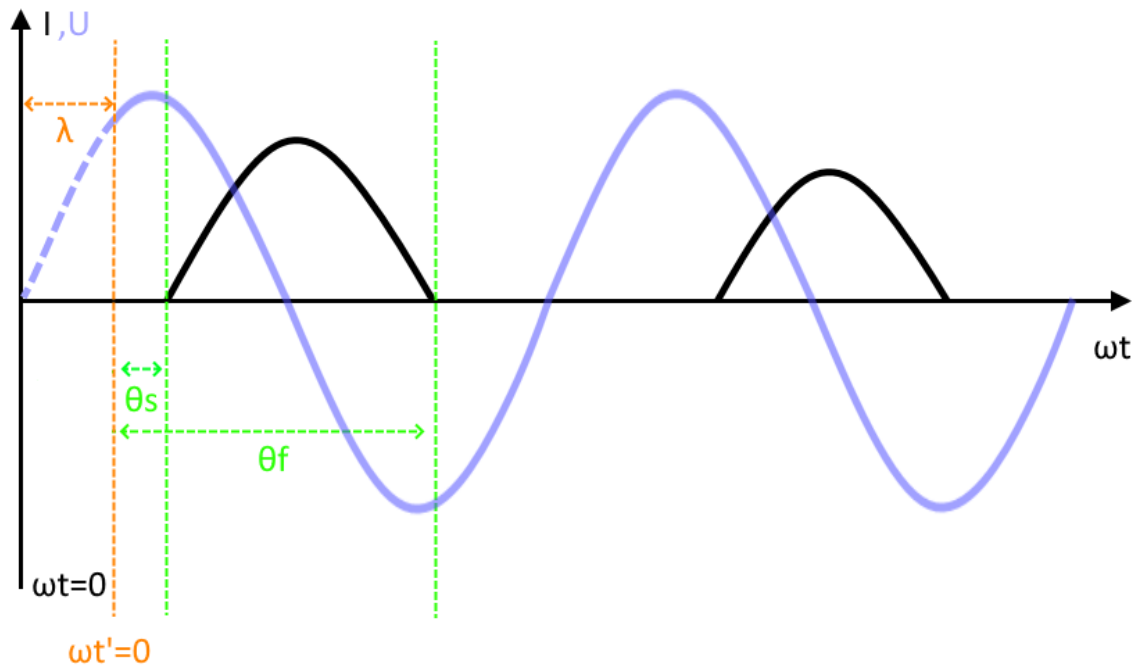
$$\Phi_r(n+1) = \Phi_r(n) - \frac{R * \omega * \Phi_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \int_{\frac{\theta_s(n)}{\omega}}^{\frac{\theta_f(n)}{\omega}} \left[\sin(\omega t - \Psi) - e^{-\frac{R}{L} \left[t - \frac{\theta_s(n)}{\omega} \right]} * \sin(\theta_s(n) - \Psi) \right] dt \quad (10)$$

egyenletet kapjuk. Ebből az integrálást elvégezve megkapjuk a következő periódus remanens fluxusát:

$$\Phi_r(n+1) = \Phi_r(n) - \frac{R * \Phi_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \left[\cos(\theta_s(n) - \Psi) - \cos(\theta_f(n) - \Psi) + \frac{L\omega}{R} \sin(\theta_s(n) - \Psi) * \left[e^{-\frac{R}{\omega L}(\theta_f(n) - \theta_s(n))} - 1 \right] \right] \quad (11)$$

Ennek ismeretében kiszámítható a következő periódus aktuális árama. [5]

3.2.2. Ha a bekapcsolási szög nem nulla:



11. ábra: Bekapcsolás lambda szögnél

A feszültség nullátmenetnél történő bekapcsolás produkálja a legkedvezőtlenebb esetet, így ezzel célszerű számolni egy transzformátor tervezése során. A számítás azonban kiterjeszthető egy tetszőleges λ bekapcsolási szögre is.

A bekapcsolási szög csak az első periódus számításánál változtatja meg a képleteket, ezután a fent ismertetett 0 bekapcsolási szöggel számolhatunk tovább. Itt is az előbb ismertetett módszerhez hasonlóan az (1) egyenletből indulunk ki, annyi különbséggel, az egyenlet integrálását a $t_0 = \lambda/\omega$ ponttól kell kezdeni, mivel innen indul a bekapcsolás. Ha követjük az előbb ismertetett gondolatmenetet, akkor az első periódusban remanens fluxus (4) összefüggés alapján marad 80%-a az üzemi csúcfluxusnak, a vasmag pedig θ_s időpontban fog betelíteni, mely az

$$\theta_s = \omega t_s - \lambda = \cos^{-1} \left[\frac{\Phi_m * \cos(\lambda) - \Phi_r(1) - \Phi_s}{\Phi_m} \right] - \lambda \quad (12)$$

összefüggéssel számolható.

A (8) egyenlet is érvényben marad, azzal a változtatással, hogy a függvény kezdeti feltétele $I=0$ amíg $t = \theta_s + \lambda$. Az első periódus áramát az

$$I(1) = \frac{\sqrt{2}U}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \left[\sin(\omega t - \Psi) - e^{-\frac{R}{\omega L}[\omega t - \theta_s - \lambda]} * \sin(\theta_s + \lambda - \Psi) \right] \quad (13)$$

függvénnyel számolhatjuk ki. Az áram értékét a vasmag telítés megszűnése miatt θ_f szögnél az előbbiekhöz hasonlóan nullának tekinthetjük. A szöveget a

$$\sin[\theta_f + \lambda - \Psi] - e^{-\frac{R}{\omega L}[\theta_f - \theta_s]} * \sin(\theta_s + \lambda - \Psi) = 0 \quad (14)$$

egyenletből, melyet matematikailag nem lehetséges θ_f – re rendezni, ezért iterációs módszerrel tudjuk meghatározni. A második periódus elején jelenlevő remanens fluxust az $I(1)$ függvény (1) egyenlet $t_0 = \lambda/\omega$ – ből való integrálásával kapott összefüggésbe való behelyettesítésével tudjuk meghatározni, melynek eredményeként a

$$\Phi_r(2) = \Phi_r(1) - \Phi_m[1 - \cos(\lambda)] - \frac{R * \omega * \Phi_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \int_{\theta_s}^{\theta_f} \left[\sin(\theta + \lambda - \Psi) - e^{-\frac{R}{\omega L}[\theta - \theta_s]} * \sin(\theta_s + \lambda - \Psi) \right] \frac{d\theta}{\omega} \quad (15)$$

összefüggést kapjuk, ahol $\theta = \omega t - \lambda$. A programban való kiszámítás leegyszerűsítése érdekében elvégezzük az integrálást, hogy egyszerűbb műveletekkel megoldható képletet kapjunk:

$$\Phi_r(2) = \Phi_r(1) - \Phi_m[1 - \cos(\lambda)] - \frac{R * \Phi_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \left[\cos(\theta_s + \lambda - \Psi) - \cos(\theta_f + \lambda - \Psi) + \frac{L\omega}{R} \sin(\theta_s + \lambda - \Psi) * \left[e^{-\frac{R}{\omega L}(\theta_f - \theta_s)} - 1 \right] \right] \quad (16)$$

Miután ezzel az összefüggéssel kiszámoltuk a remanens fluxust a második periódusban, kiszámíthatjuk a második periódus áramát is, de azt már a (8) függvény segítségével. Az összes további periódushoz tartozó remanenciát, a telítési pontot, és áramot innentől kezdve 0 bekapcsolási szöggel kell számolni. [5]

3.2.3. Kapcsolási csoportok figyelembevétele háromfázisú transzformátorok esetén

Az előbb ismertetett számolási módszer csak az egyfázisú transzformátor bekapcsolási áramlökésére adott eredményt. A háromfázisú transzformátorok esetén is alkalmazható ez a megoldásmenet, azonban figyelembe kell venni a transzformátor kapcsolási csoportját is, valamint a vasmag kialakítását. A projekt során elkészült program egy 3 oszlopos, mag típusú transzformátor bekapcsolási áramlökését képes kiszámolni, különböző kapcsolási csoportok esetén. A következő kapcsolási csoportokat vizsgáljuk a bekapcsolási jelenség számítása során:

Kapcsolások	Primer (vizsgált) oldal	Kapcsolási csoport
Dy	D	Dy-Yd primer D
Yd	D	
Dy	Y	Yd-Dy-Yy(d) primer Y
Yd	Y	
Yy(d)	Y	
Yy	Y	Yy primer Y
YNy	YN	YNy-Yyn primer YN
Yyn	YN	
YNd	YN	

Az I bekapcsolási áram kiszámításához ismernünk kell a transzformátor bizonyos paramétereit. Mivel a bekapcsolási áramlökés csak a primer oldalon lép fel, és a szekunder oldal ki van szakaszolva, elég csak a primer oldali tekercs tulajdonságait megadni. Mivel a számítás egy légmagos tekercset vesz figyelembe, nekünk az 9. ábra alapján az R és az L meghatározása szükséges. Az két paraméter több összetevőből áll: A primer tekercs ellenállása és induktivitása R_t és L_t , valamint a mögöttes hálózat ellenállása és induktivitása R_s és L_s . A tényleges értékeket minden kapcsolási csoport esetén máshogy számoljuk. L_t értékének meghatározásához szükségünk van a primer tekercs menetszámára. A menetszámot delta kapcsolású primer tekercs esetén

$$N = \frac{U_v}{U_{menet}}$$

egyéb esetekben pedig

$$N = \frac{U_v}{\sqrt{3} * U_{menet}}$$

képletekkel számoljuk, ahol U_v a névleges primer vonali feszültség. A program bemeneteként megadott primer tekercs méretei és a menetszám alapján a tekercselés induktivitását az

$$L_t = \frac{\pi^2(D + 2W_r)^2 * N^2}{10^{10} * H}$$

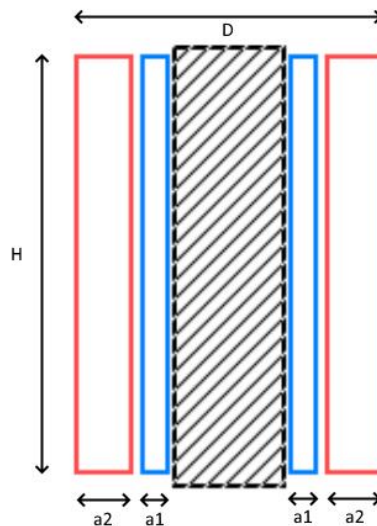
összefüggésből határozhatjuk meg, ahol:

D: a tekercs belső átmérője,

W_r : a tekercs redukált szélessége,

H: a tekercs mágneses magassága.

Mindhárom paramétert [mm]-ben kell megadni, ahol a tekercs redukált szélessége 12. ábrán is látható tekercsszélesség harmada.



12. ábra: A tekercs méretei

A tekercselés R_t ellenállása függ a kapcsolástól, delta kapcsolású tekercs esetén

$$R_t = \frac{\pi(D + 3W_r) * N * \rho * \sqrt{3}j}{1000I_n}$$

minden más esetben

$$R_t = \frac{\pi(D + 3W_r) * N * \rho * j}{1000I_n}$$

képletekből számolható, ahol:

ρ : a tekercs anyagának fajlagos ellenállása [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$],

j : a tekercs áramsűrűsége [A/mm^2],

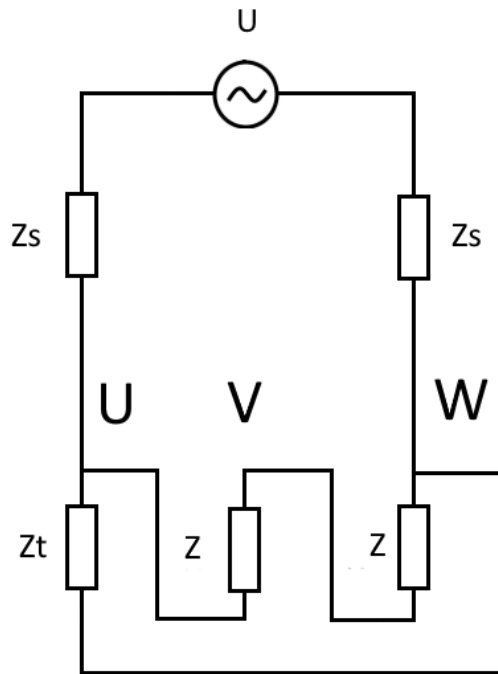
I_n : névleges vonaliáram [A].

A vasmag a típusától függően 2,0-2,05T indukciónál telítődik be. Mivel a szoftverrel a legkedvezőtlenebb esetet szeretnénk kiszámolni, ezért a telítési pontra mondhatunk 2T értéket, így kiküszöbölhetjük a vasmagok típusából adódó bizonytalanságot. Az előbb tett feltétel alapján a telítési fluxus a vasmagban kiszámítható a

$$\Phi_s = \frac{2T}{B_n} * \frac{\sqrt{2}U_{menet}}{\omega}$$

képlettel, ahol B_n a vasmagban kialakuló maximális indukció. A bekapcsoláskor fellépő fluxusamplitúdó nem minden kapcsolási mód esetén azonos az egyfázisú megfontolásokkal. Háromfázisú transzformátorok esetén a fluxusamplitúdó függ a transzformátor kapcsolási csoportjától, melyet fenti kapcsolási csoportos táblázat szerint négy csoportba tudunk sorolni.

Dy-Yd primer D csoport esetén egy szigetelt csillag és egy delta kapcsolású tekercselésünk van, ahol csak az utóbbival kell foglalkoznunk, mivel a csillag oldal nem képes ellengerjesztésre. Mivel a program az egyfázisú számításokra épül, így egyszerre csak az egyik fázis áramát képes figyelembe venni.



13. ábra: Dy-Yd D-primer

A 13. ábrán az U fázist tekintjük a vizsgált tekercsnek, mely telítésbe fog kerülni. A generátor a Z_s rendszerimpedancián keresztül van rákötve az U fázis tekercsére, azaz a Z_t impedanciára. Ebben az esetben a bekapcsoláskor érvényes fluxusamplitúdót számolhatjuk a (2) képlet alapján, ahol a feszültség és a menetszám helyett a menetfeszültséggel, így a

$$\Phi_m = \frac{\sqrt{2}U_{menet}}{\omega}$$

összefüggéssel is számolhatunk. Az számolás során használandó induktivitás és ellenállás értékek az ábrán látható impedanciák eredője alapján

$$R = 2R_s + R_t$$

$$L = 2L_s + L_t$$

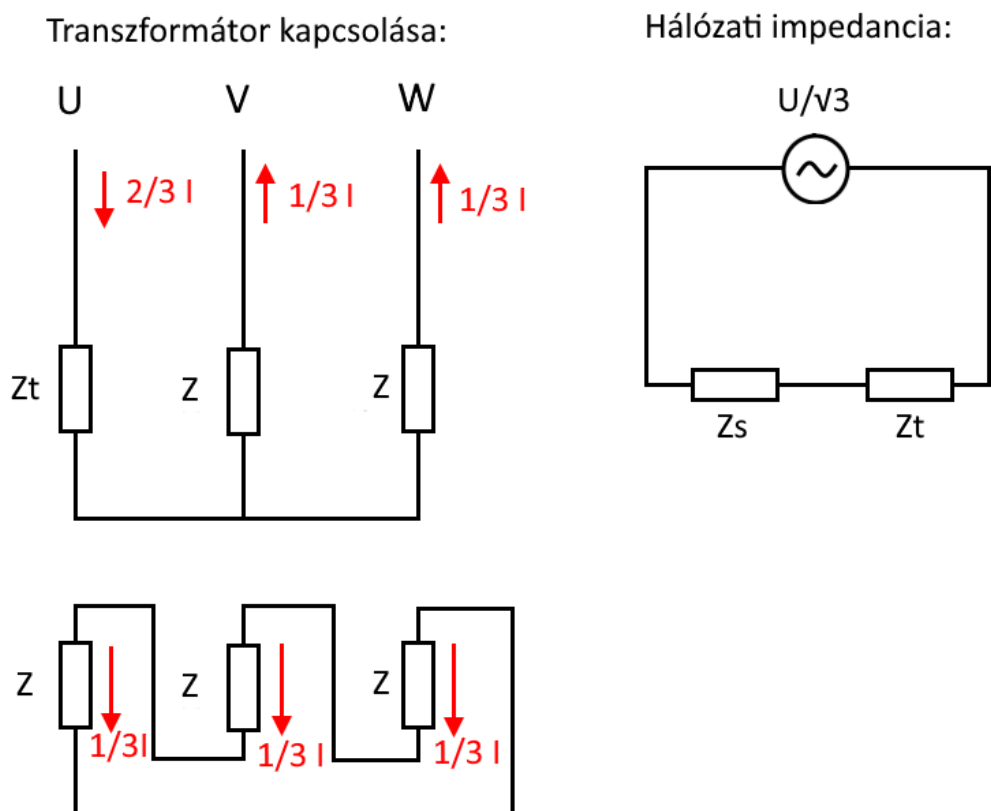
képletekkel számolhatók. Mivel a tekercselés delta kapcsolásba van kötve, így a hálózati vonali feszültséggel számolhatunk.

Yd-Dy-Yy(d) primer Y kapcsolási csoport esetén a primer oldal szigetelt csillag, de a transzformátorban található egy delta tekercs, vagy a szekunder oldal tekercseléseként, vagy pedig terciér tekercselésként. A bekapcsolási jelenség során a fázisokban folyó áramok csak a

másik két fázison tudnak visszafolyni. A 14. ábrán látható, hogy a telített U fázis gerjesztőárama a saját áramának 2/3 részéből, és a két másik telítetlen fázis gerjesztőáramainak 1/3 részéből áll össze. Ez a delta tekercselésben folyó kiegyenlítő áramoknak köszönhető, melyek 33%-kal csökkentik a bekapcsolási áramlökést. A számításához meghatározandó bekapcsolási fluxusamplitúdót a leírt jelenség alapján a

$$\Phi_m = \frac{2}{3} * \frac{\sqrt{2}U_{menet}}{\omega}$$

összefüggésből számíthatjuk ki.



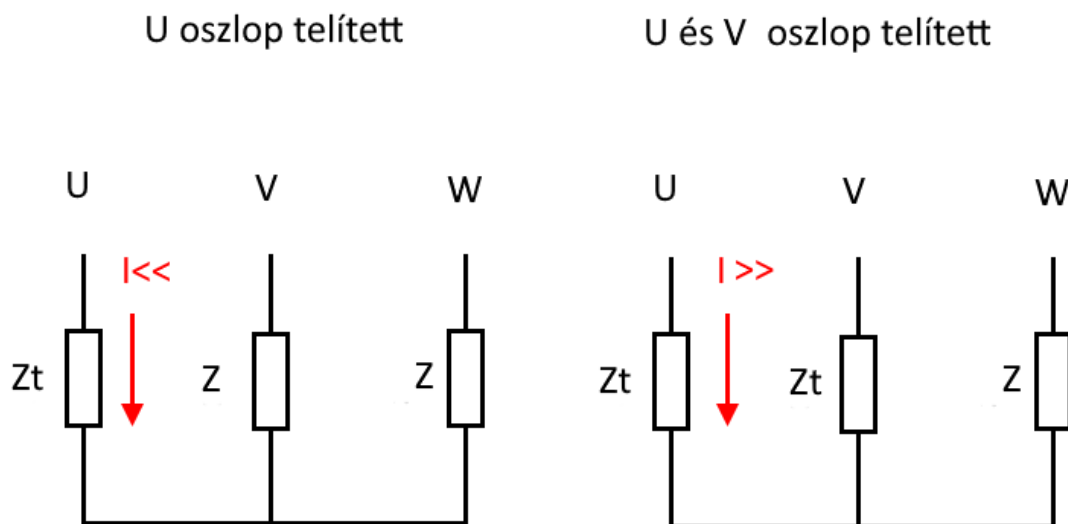
14. ábra: Dy-Yd-Yy(d) primer Y

A számítás után kapott áramot a delta tekercselés kiegyenlítő hatása miatt 33%-kal csökkenteni kell. A helyettesítőképből meghatározható az impedancia számításához szükséges ellenállás és az induktivitás is:

$$R = R_s + R_t$$

$$L = L_s + L_t$$

Az Yy primer Y kapcsolási csoportnál két csillagba kapcsolt tekercsünk van, melyek csillagpontjai szigeteltek. Hasonlóan az Yd-Dy-Yy(d) primer Y csoporthoz, itt sem folynak zérussorrendű áramok, itt viszont nincs kiegyenlítő delta tekercselés. Az áramnak emiatt két tekercsen keresztül kell visszafolynia a hálózatba. Fázishelyzettől függően lesznek olyan pillanatok, mikor csak egy oszlop lesz telítésben. Ilyenkor a nem folyik nagy áram, mivel a telített oszlop tekercséhez sorosan kapcsolódó telítetlen oszlopokon lévő tekercseknek a nagy induktivitása miatt nagy impedanciája is lesz. Mikor azonban a tekercseken folyó gerjesztőáram két oszlopot hoz telítésbe, olyankor mindkét telített oszlopon lévő tekercs légmagos tekercsként viselkedik, impedanciájuk kicsi, a bekapcsolási áram ezért nagy.



15. ábra: Yy Primer Y

Ebben az esetben – mivel a két telített tekercs vonali feszültséget kap – a bekapcsoláskor fellépő fluxusamplitúdót a

$$\Phi_m = \frac{\sqrt{3}}{2} * \frac{\sqrt{2}U_{menet}}{\omega}$$

képlet szerint számoljuk, az ellenállást és induktivitást pedig

$$R = R_s + R_t$$

$$L = L_s + L_t$$

összefüggésekkel.

YNy-Yyn primer YN kapcsolási csoportnál a tekercsek csillagba vannak kötve, és a csillagpont le van földelve. Mivel a zérussorrendű áramok a földben tudnak folyni, ezért azt a feltételezést tesszük, hogy a zérussorrendű impedancia nulla. Ilyenkor a csillagpont potenciálja is nulla, így számolható a legkedvezőtlenebb esetre a bekapcsolási áram. Ha található tercier tekercselés a transzformátorban, és a csillagpont földelve van akkor is ezt a kapcsolási csoportot kell választani, mivel a zérussorrendű áramok elfolynak a földben, így a delta tekercs nem képes kompenzálni a tekercsek áramát. A tercier tekercselésnek itt akkor van jelentős szerepe, mikor egy aszimmetrikus zárlat lép fel a hálózaton. Ilyenkor a nagy zárlati áram miatt a földelési ellenállásnak köszönhetően képes a csillagpont potenciálja megemelkedni, amit a tercier tekercselés kompenzálni tud bizonyos mértékben. Mivel a bekapcsolási áramlökés olykor megközelítheti egy zárlat áramát, tercier tekercselés esetén ez a kompenzáció bekövetkezhet, de ezt a legrosszabb esetre való számolás miatt most elhanyagoljuk. Számolás során követhetjük az egyfázisú transzformátor számítása során ismertetet gondolatmenetet, mely szerint a fluxusamplitúdót a

$$\Phi_m = \frac{\sqrt{2}U_{menet}}{\omega}$$

az impedancia összetevőit pedig a

$$R = R_s + R_t$$

$$L = L_s + L_t$$

képletekkel számolhatjuk. A vonali feszültséget viszont $\sqrt{3}$ -ad részére csökkentjük, mivel csillag kapcsolás esetén a tekercsekre csak fázisfeszültség jut. A négy kapcsolási csoport közül ennél a típusnál lesz a legnagyobb a bekapcsolási áram. [5] [10] [11]

3.3. Programkódban való megvalósítás

A program böngészőből fut, melyet egyetlen HTML fájl megnyitásával tudunk futtatni. A megnyitás után a kezelőfelület lesz látható beviteli mezőkkel, melyet szimpla szöveg és input elemek képeznek. Minden input elem kapott egy azonosítót, melyek alapján a programkódban hivatkozni lehet rájuk. Az elemek elrendezését, a háttér színét, valamint a méretezést a program végén található CSS (Cascading Style Sheet) írja le. A kezelőfelületen négy gomb található, mind JavaScriptben írt függvényeket hívnak elő, melyek különböző feladatokat végeznek el.

A fájlban több JavaScript-kód is található. Közülük az első és a legegyszerűbb az automatikus kitöltés. Ez a program megnyitása után azonnal lefut, és kitölt pár olyan beviteli mezőt, amely gyakran időt takarít meg a felhasználónak. Ilyen pl. a remanens fluxus mérete a bekapcsolás pillanatában. Ezt az előző fejezetben a legrosszabb esetre vettük, a névleges fluxusamplitúdó 80%-ára. Ezt tipikusan csak akkor kell állítani, ha meg szeretnénk határozni a bekapcsolási áramlökést egy kisebb remanencia esetén is, ezért ezt automatikusan kitöltjük. Kitöltjük még a hőmérsékletet 20 fokra, valamint a hálózati impedanciát 0 értékre vesszük alapértelmezetten. Később a programban automatikusan kitöltésre kerül a vezető anyaga is, mivel ez majdnem mindig rézből van, de igény szerint alumínium vezetőre is kiszámolható.

A program számító részét a „Számol” gombbal lehetséges elindítani. A gombra kattintva előhívjuk a main() függvényt, ezzel megkezdődik a számolás. A számolás előkészítéséhez a függvény elején meghatározzuk a változókat az inputok azonosítója alapján. Ezek a változók a nagy számuk miatt globálisak, mivel így a többi függvénynek nem kell átadni az értékeiket. A bemeneti változók után meghatározunk pár matematikai változót is, mint pl. a π vagy a $\sqrt{3}$, melyre a böngészőbe beépített Math könyvtár használható. További meghatározandó változókat is számolunk, egyszerű képletekkel, ilyen pl. a szögsebesség, a menetszám, fajlagos ellenállás, stb. Az egyszerűbb adatok ismeretében kiszámítható a tekercs ellenállása és induktivitása, majd utána a kapcsolástól függő fluxusamplitúdó, az eredő ellenállás és induktivitás, ebből pedig az eredő impedancia. Miután meghatároztuk a változókat, kiszámítható a bekapcsolási áramlökés.

```

//szamolas
I=0;
step=0.0001; //lepeskoz
n=0; //periodus nullazasa
diag=0;
var xValues=[];
var yValues=[];
var y2=[];

for(t=step;t<=1.03;t+=step){
    t=parseFloat(t.toFixed(7));
    eredmeny=i(t)/V3;
    if (eredmeny<=0) eredmeny=0;
    if (!eredmeny && eredmeny !=0) {alert("Hiba történt a számolás során"); return 1;}

    if(t>=syst) {sysPos+=1;Rsvalto();}

    console.log(t + "s: " +eredmeny );
    xValues[diag] = t;
    yValues[diag] = eredmeny;
    y2[diag] = 0fn;
    diag++;
}
makediag("result",xValues,yValues,y2);
}

```

16. ábra: A számító fő ciklus programkódja

A képen látható a fő számoló programrész, mely a main függvényen belül, a változók számítása után található, ezért a „Számol” gomb hatására egyszer fut le. Ahhoz, hogy a számítást futtatni lehessen a program újraindítása nélkül, számolás elején minden használt globális változót nullázunk. A számolás elején meghatározható a „step” ami a számítások sűrűségét adja meg egységnyi időn belül. Minél kisebb ez a szám, annál pontosabb értéket kapunk, ugyanakkor annál lassabban is kapunk eredményt. A „step” nem módosítható a kezelőfelületről. A számítás egy for ciklusban történik, ahol t időt növeljük a lépésközzel minden egyes ciklusban. A képen látható „t<=1.03” a befejezési időt mutatja, vagyis azt, hogy mennyi ideig számolja ki a program az áramlökést. Értelemszerűen a nagyobb számok hosszabb számítási időt kívánnak. Az időt 7 tizedesjegyre rögzítjük, mert azt tapasztaltam, hogy ha nincs rögzítve, akkor helytelenül működik a program. Ebből a ciklusból hívjuk meg az i(t) függvényt, melynek az eredménye megadja egy bizonyos időpontban a vonaliáramot. Ha a kapott eredmény nulla alatti, akkor az előző fejezetben ismertetett számolási módszer szerint azt nullának tekintjük, valamint, ha nem kapunk vissza eredményt, akkor egy hibaüzenet mellett visszatér a függvény és befejezi a futást. Minden ciklusban ellenőrizzük, hogy a felhasználó által megadott rendszerimpedanciára vonatkozó időállandók érvényesek-e. Ha nem, akkor meghívjuk az Rsvalto() függvényt, amely újból kiszámolja a kapcsolásokhoz tartozó impedanciákat, immár a következő időszakra érvényes rendszerimpedanciákkal. Miután végeztünk a számolással, az eredményt időbélyeggel együtt kiíratjuk a konzolra, majd eltároljuk egy tömbben. A program

miután kilépett a ciklusból a két tömb elemei alapján megrajzoljuk a diagrammot a Chart.js könyvtár által szolgáltatott függvénnyel. A main függvény ezután visszatér, az eredmények megtekinthetőek.

A számítás során megnyitott $i(t)$ függvény lényegében az előző fejezetekben ismertett képletek alapján számol, majd visszatér egy eredménnyel. Itt a θf számítás folyamatát érdemes megemlíteni, ugyanis itt iterációs módszerrel számoljuk annak értékét.

```
function Of(){
  steph=0.1;
  res=0sn+0.00001; // a fuggveny 0sn-ben is 0, de nekunk az azt koveto nullatmenet kell.
  tmp=0;
  st=0;

  while(st<1000){
    tmpLast=tmp;
    tmp= Math.sin(res+szog-ofs)-(Math.pow(Math.E, -(R/(W*L)))*(res-0sn))*Math.sin(0sn+szog-ofs));
    if (tmp*tmpLast < 0) steph=steph*(-0.1);
    if (Math.abs(tmp)<0.0000001 && res) return res;
    res+=steph;
    st+=1;
  }
  return 0; //hiba
}
```

17. ábra: θf -számoló függvény

Az $i(t)$ függvényből hívjuk meg az $Of()$ függvényt, mely a θf -et számolja az előbb említett iterációs módszerrel. Az előző fejezetben megjelölt (9) egyenlet segítségével meghatározható az összes olyan pont, ahol az áramfüggvénynek nullátmenete van. Mivel a θs is nullátmeneten helyezkedik el, ezért attól minimálisan pozitív irányban eltérve „steph” nagyságú lépésekben közelítünk θf felé. A (9) egyenlet kimondja, hogy a kifejezésnek nullának kell lennie, ezért két tárolót(tmp) hozunk létre, majd minden ciklus elején beletesszük a régebbi értéket tárolóba az újabb tároló értékét, az újabb tárolóba pedig az összefüggés eredményét. Ha θf értékét átléptük, a két tároló szorzata negatív szám lesz, mivel a két tárolóban ellentétes előjelű értékek lesznek. Ilyenkor a lépésközt $-0,1$ el megszorozva ellentétes irányba fordítjuk, ezzel együtt finomítunk a lépésméretre is. Ha az összefüggés elég kicsi ahhoz a tűréshez, amit beállítottunk, a függvény visszatér a θf szöggel, mely a „res” változóban található. A ciklus 1000-szer fut le, ha addig nem talál eredményt, akkor egy hibával tér vissza.

A kódban található még egy $changeInt(irany)$ nevű függvény is, ami a beviteli mezőnek a hálózati adatok megadásánál található nyilak működését írja le. Ez a maga nemében láthatatlanná teszi az egyik befejezési időhöz tartozó beviteli mezőket, és láthatóvá teszi a következő, vagy éppen az előző időhöz tartozókat. A könnyebb átláthatóság érdekében az

időszak vége beviteli mezőbe beírt értékeket intervallumként is kiíratja a képernyőre. Az „irany” paraméter 3 típusú lehet: 1 és -1 esetén lépteti az intervallumot, és a hozzátartozó beviteli mezőket, majd frissíti az intervallum kiíratást. 0 esetén léptetés nélkül frissíti az intervallumot, ezzel a paraméterrel a beviteli mezőn való billentyűnyomás hatására hívja meg a függvényt.

A fájl legvégén található egy gyorsbetöltő funkció, mely egy, a programkódba írt adatokkal tölti fel gyorsan a beviteli mezőket. Ezt a funkciót használtam a fejlesztés során, így gyorsabban tudtam a működést vizsgálni.

3.4. Transzformátoron mért eredmények kiértékelése

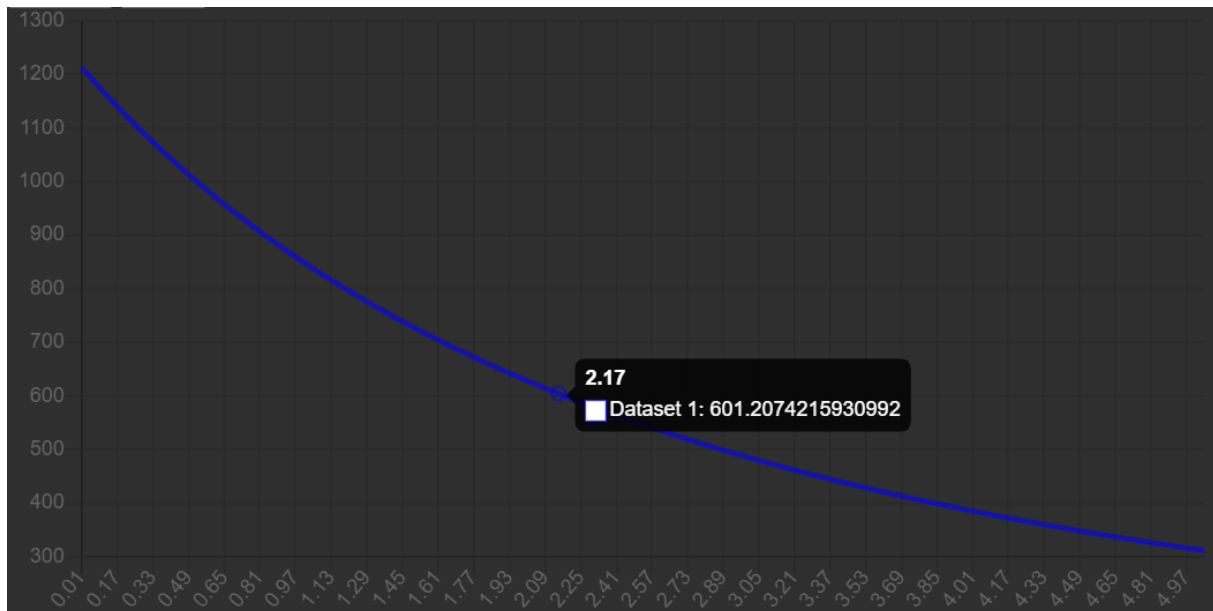
3.4.1. Bekapcsolás remanencia nélkül

A vizsgálatra a transzformátor úgy lett megválasztva, hogy annak megvolt a számítási lapja, így ebből kiolvashatók voltak a számolóprogramba beadott adatok. Egy közepes méretű transzformátorról van szó, melynek a számításhoz szükséges adatait a számítóprogram kitöltött beviteli mezőin láthatjuk.

Transzformátor adatai:		Hálózati adat:	Időszak: 0s -		
Névleges teljesítmény:	40000	kVA	Hálózat ellenállása:	0	Ohm
Frekvencia:	50	Hz	Hálózat induktivitása:	0	H
Indukció:	1.497	T	Időszak végpontja:		s
Remanencia:	0	% Bn	<< >>		
Menetfeszültség:	131.6	V			
Primer feszültség:	132	kV			
Bekapcsolási szög:	0	fok			
Kapcsolás:	YNy-Yyn primer YN ▾				
Primer tekercs adatai:					
Áramsűrűség:	1.726	A/mm ²			
Belső átmérő:	846	mm			
Tekercselés redukált szélessége:	33.5	mm			
Tekercs mágneses magassága:	1475	mm			
Tekercs hőmérséklete:	22	C			
Tekercs anyaga:	<input checked="" type="radio"/> Réz <input type="radio"/> Alu				
Számol		Betölt			

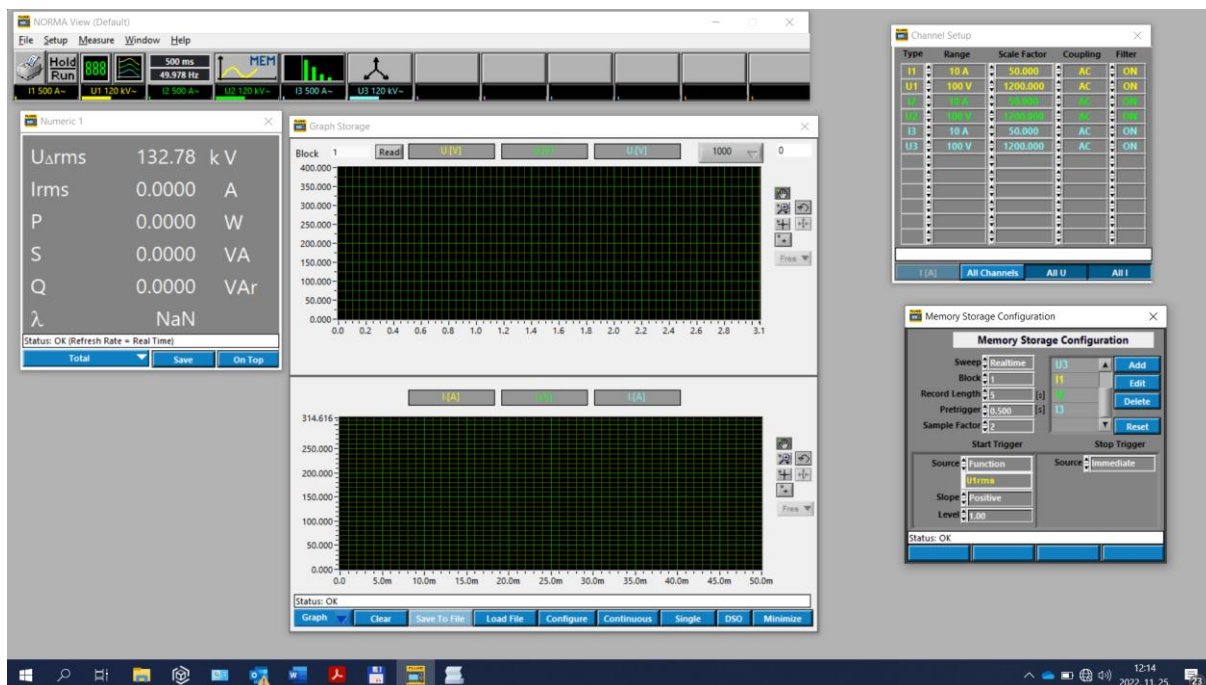
18. ábra: Vizsgált transzformátor adatai a program beviteli mezőiben

Mivel a hálózati adatok ismeretlenek, ezért azokat most elhanyagoljuk. Remanens fluxus nélkül számolunk egy bekapcsolást a programmal, ennek eredményeit láthatjuk az alábbi ábrán. A számítás most a periódusok maximális áramait köti össze, így kapjuk a lenti görbét. Látható, hogy az első periódusban a legnagyobb az áram maximuma, itt 1211 A áramerősséget ér el az áramlökés. Mikor a periódusáramok maximuma eléri az első hullám felét, azt az áramfüggvény középértékének nevezzük, mely az ábrán 2,17s-nél található az áramfüggvényben. Az első számítást ezután összevethetjük a mért értékekkel.



19. ábra: A számolóprogram eredményei 0 remanenciára és 0 bekapcsolási szögére

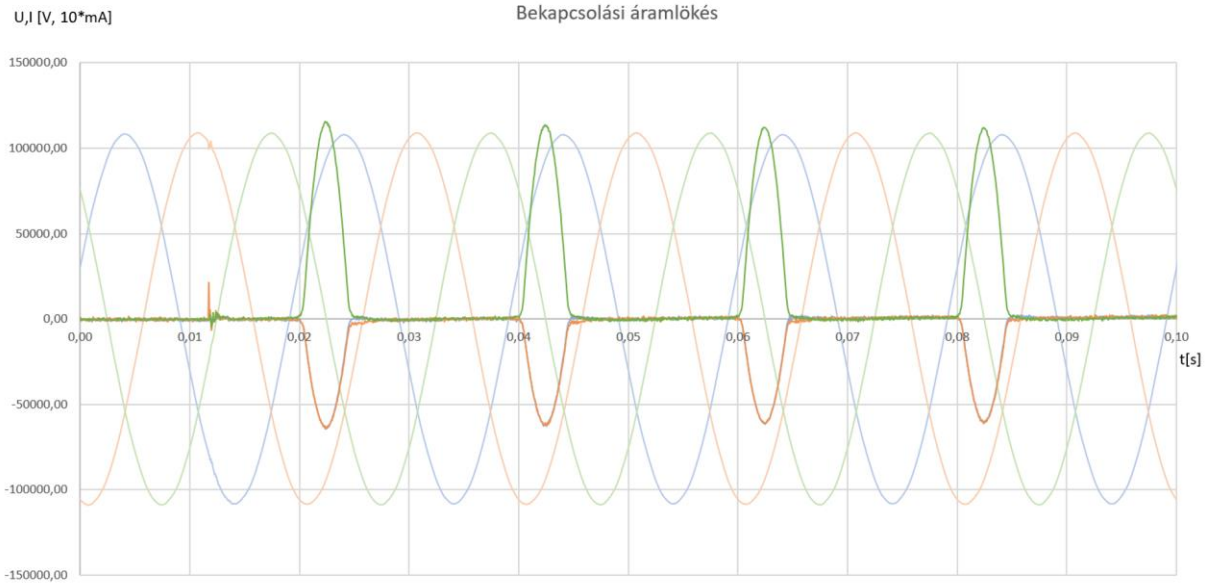
A mérés 2022 novemberében egy budapesti alállomáson történt a 40 MVA névleges teljesítményű, YNd11 kapcsolású transzformátoron. Elmondható a mérésről, hogy nem laboratóriumi körülmények között történt, ugyanis egy ilyen méretű transzformátort laborba szállítani nagyon körülményes, és költséges folyamat. A bekapcsolást a nagyfeszültségű oldalon végeztük el, míg a kisfeszültségű oldal ki volt szakaszolva, csak egy csillagpontképző transzformátor volt a szekunder oldalon. A megtáplálás az ELMŰ NAF hálózataról történt, 132kV feszültségszinten. Egy Fluke Norma 5000 típusú műszerrel történt a mérés, melynek bemeneteire az alállomási kombinált mérőváltók szolgáltatják a jelet. UTP kábelen keresztül kötöttük a műszert a számítógéphez, melyen az alábbi képernyőképen látható, NORMA View nevű program fut.



20. ábra: A Fluke mérőműszer számítógépes programjának felhasználói felülete

A képen látható program felületén több ablak is látható, melynek bal oldalán a pillanatnyilag mért értékek szerepelnek, középen pedig a felvett időszak feszültség és áramfüggvénye rajzolható ki. Jobb oldalt felül a kombinált mérőváltók áttétele állítható, hogy a program át tudja azokat számolni a valós értékekké, jobb alul pedig a felvétel beállításai találhatók, mint pl. indítás triggerjelre, felvétel hossza stb... Mérés során a program a triggerjel, vagy a kézi indítás időpontjától számított felhasználó által beírt időn keresztül veszi az adatokat. Mi ezt az időt 10 másodpercre állítottuk. Az eredmények ezután elmenthetők egy tabulátorral tagolt txt fájlba, mely beilleszthető Excelbe.

Az első bekapcsolás előtt a transzformátoron karbantartást végeztek, ezért vélhetően a vasmag elég időt kapott a lemágneseződéshez. Az első bekapcsolás eredményeit a következő diagram mutatja:



21. ábra: Az első bekapcsolás feszültségviszonyai

A diagramból leolvasható a csúcsheszültség, mely akár ki is számítható a 20- ábrán látható U_{RMS} értékéből:

$$\hat{U} = \frac{U_{\Delta RMS}}{\sqrt{3}} * \sqrt{2} = \frac{132,78kV}{\sqrt{3}} * \sqrt{2} = 108,41kV$$

Most nézzük meg az áramfüggvényt az első 3 másodpercre:

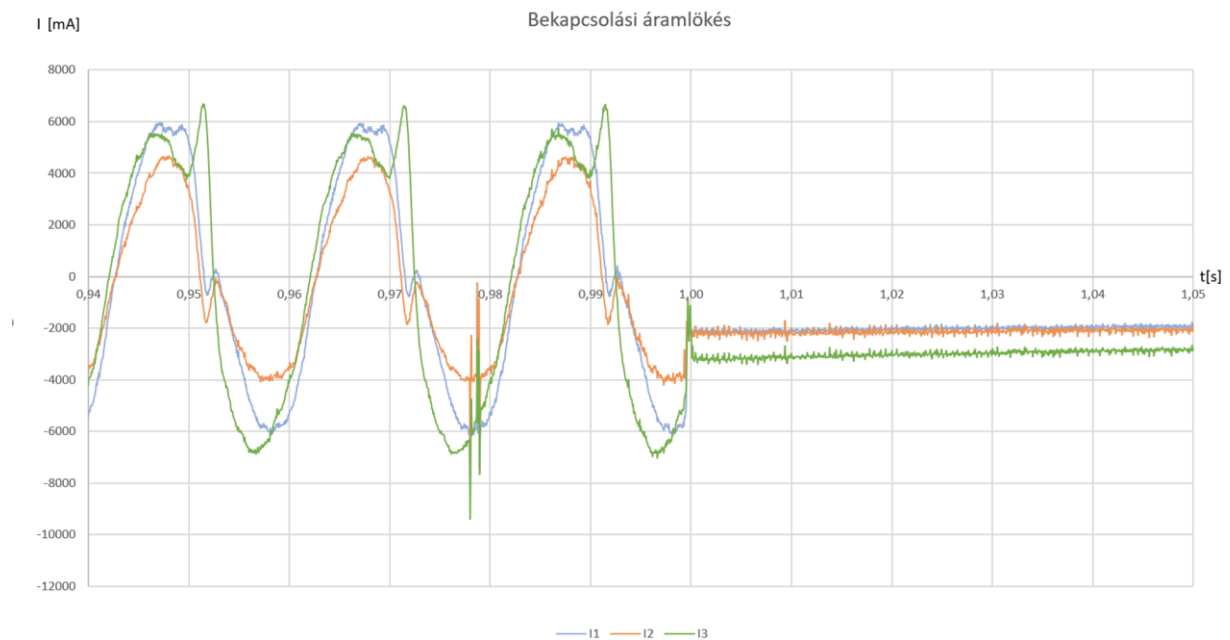


22. ábra: Az első bekapcsolás időfüggvénye

A piros jelölés az áramlökés csillapodásának félértékét mutatja. Ez az első áramcsúcs után kb. 2,16s-nél következik be. Ha most visszatekintünk a számolt eredményekre (19. ábra), akkor látható, hogy a számításunk helyes volt. Ez részben annak is köszönhető, hogy a remanencia a lemágneseződés során igencsak lecsökkenhetett, továbbá a 21. ábrán látható egy jelenség mely a bekapcsolás pillanatában történt és az áram és a feszültségjelben is zavart okozott. Ha ezt a zavart vesszük a bekapcsolás pillanatának, akkor elmondható, hogy a számolt fázis feszültsége jó közelítéssel a nullátmeneten ment keresztül, így az az állapot állt fel, mint amit a számolóprogrammal számoltunk. Mindazonáltal fontos leszögezni, hogy ez a feltételezés csak közelítőleg helytálló, ugyanis, ha csak egy kicsi fluxus is maradt a magban, vagy a feltételezett bekapcsolási szög pár fokkal eltér a nullától, akkor már más eredményt kapunk. Azt is figyelembe kell venni, hogy a számítóprogram sok helyen elhanyagolásokat tesz, és több helyen a legrosszabb esetre számol – lásd vasmag telítési pont.

3.4.2. Bekapcsolás remanenciával

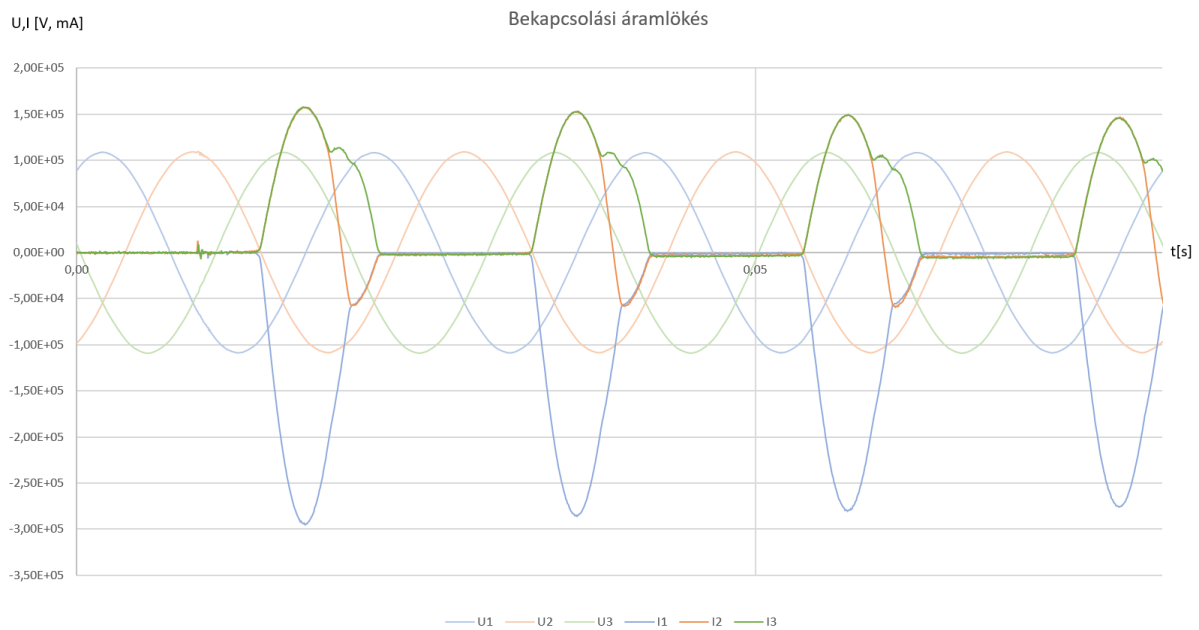
Most nézzünk meg egy kikapcsolást:



23. ábra: Az első kikapcsolás

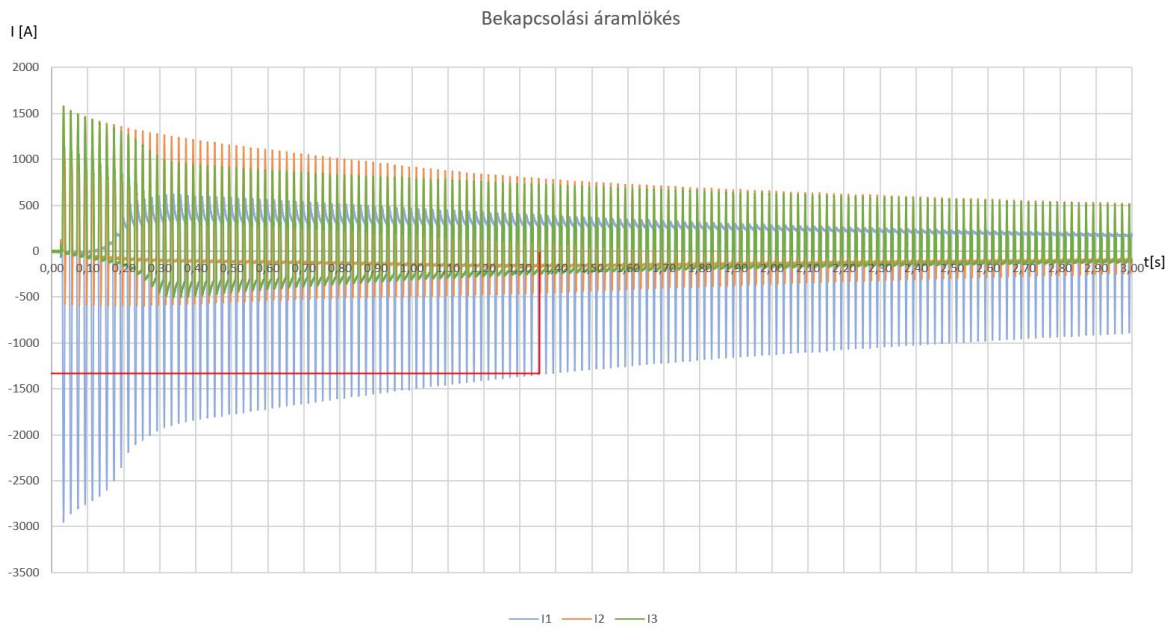
Az áramlökés lecsengése után a transzformátor üresjárási árama 6A csúcsertékű, ami a névleges áram 2,42%-a. Tipikusan az üresjárási áram és a névleges áram aránya 1% alatt szokott lenni, itt viszont volt egy csillagpontképző transzformátor a szekunder oldalán, amely egy kis terhelést jelentett a primer oldalnak. A kikapcsolás időpontjától függően a transzformátorban maradt

fluxus most beállt egy általunk ismeretlen értékre. Meg kell említeni, hogy az áramok fázishelyzete ugyanaz mindhárom fázis esetén. Ez a jelenség erősen transzformátorfüggő, függ a vasmagtól, a kapcsolástól, a tekercseléstől, a fluxusok egymástól való viszonyától, stb. A következő bekapcsolás eredményei láthatók alább:



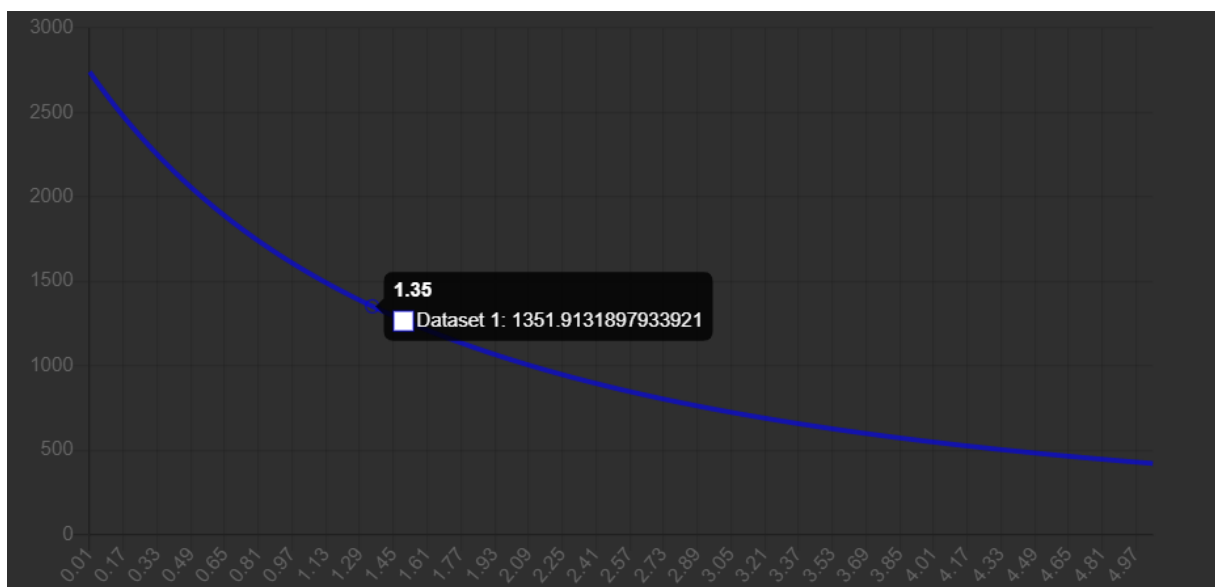
24. ábra: Bekapcsolás remanens fluxussal a magban

A bekapcsolásnál fennálló zavar a jelben itt is látható. Ha ezt vesszük a bekapcsolás időpontjának, U1 és U3 majdnem ugyanabban a fázisszögben kapcsolnak, míg U2 közel 90 foknál. Észrevehető, hogy a legnagyobb áramlökést I1 produkálta, holott I3 feszültsége is ugyanazon a feszültségszinten volt a kapcsolás pillanatában. Ennek oka a maradék fluxusban keresendő: A remanencia a 120 fok eltolás miatt mindig valamelyik oszlopban ellentétes lesz a másik két oszlopban levőhöz képest. Az I1 által gerjesztett oszlopban volt a nagy negatív irányú maradék fluxus, míg a másik két áram által gerjesztett oszlopban ellentétes irányú, kisebb fluxusok maradtak. Ennek okán a bekapcsolási áramlökés is kisebb lesz a két másik fázisban. Mérési eredmények az első 3 másodpercre:



25. ábra: Bekapcsolás remanens fluxussal, áram- időfüggvény

Az eredmények alapján látható, hogy a bekapcsoláskor I1 fázisában az első pár periódusban gyorsabb volt a csillapodás kb. 0,2 másodpercig. Ez a hálózat tranziens és szubtranziens reaktanciájából adódik, melyek csak kis ideig állnak fenn, ezáltal viszont megváltoznak az áramlökés tulajdonságai.



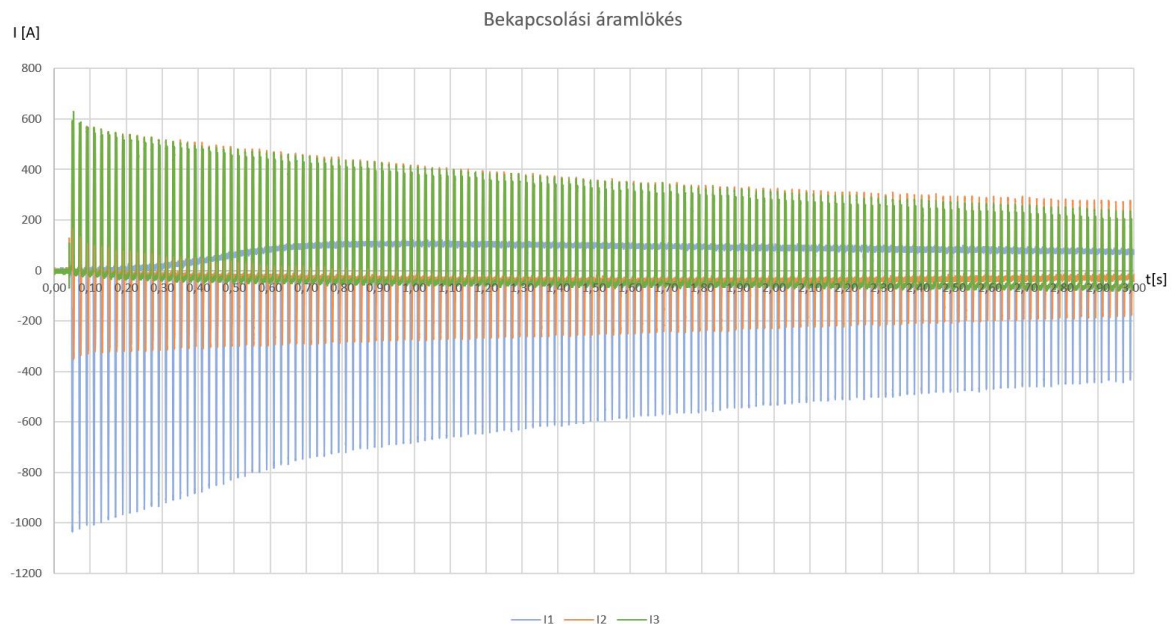
26. ábra: Remanens fluxussal való számítás programmal

Az I1 fázisra lefuttatott számítás eredménye látható a fenti képen. A bekapcsolási szög a zavarjel pozíciójából ítélve közelítőleg 25-30 körül lehet, ezt a programban 25 fokra állítottam, a maradék fluxust pedig 80%-ra. Mivel nem ismerjük a hálózat adatait, ismét anélkül kell

számolnunk. Az eredményből látszik, hogy az áram csúcsa 2705A, ami a félértéket 1,35s-nél éri el.

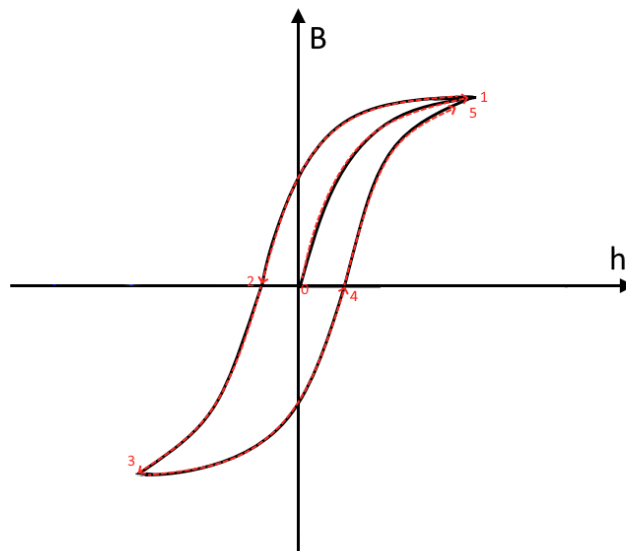
3.4.3. Negatív nagyságú tüskék, félperiódusok

Az utolsó mérés eredménye a következő lett:



27. ábra: utolsó mérés időfüggvénye

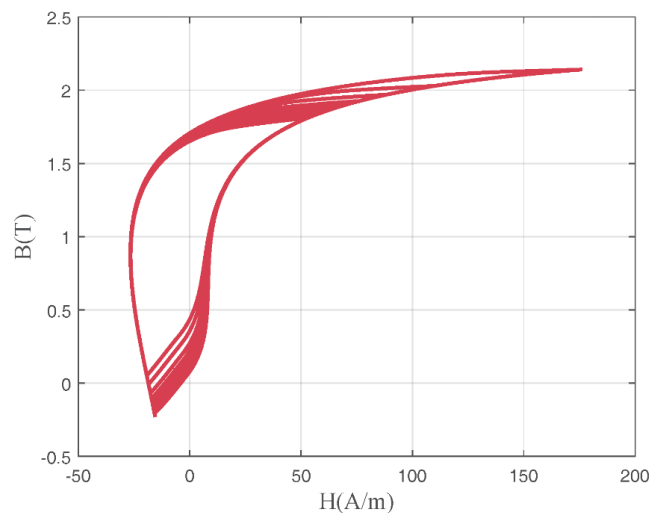
Észrevehető, hogy az I1 áram időben csillapodik, ugyanakkor - az ismertett számítási elmélettel ellentétben - nem ül rá a nulla vonalra. Az elméletben ismertett számítási módszer minden negatív periódust levág, miközben a mért értékek 100A, sőt a második mérés esetén 500A is volt az áramlökés ellentétes félperiódusában mérhető áramerősség. Ennek oka, hogy a számítás nem veszi figyelembe a vasmag mágnesezési görbéjét, kizárólag a telítési pont(2T) időpontját határozza meg, ahonnan a tekercs légmagos induktivitásával és ellenállásával számítja az áramerősséget. A valóságban még a 11.ábrán látható telítési görbe sem lenne a valós görbe, ugyanis a vasnak hiszterézise van. A hiszterézis oka, a vasmaggerjesztésében keresendő. A vasban található mágnesezett cellák beállításához idő kell, és ezért egy telített vasmagban a gyorsan változó gerjesztőáram sebességét csak lassabban tudja követni. A megváltozott mágnesezési görbét a következő ábra mutatja:



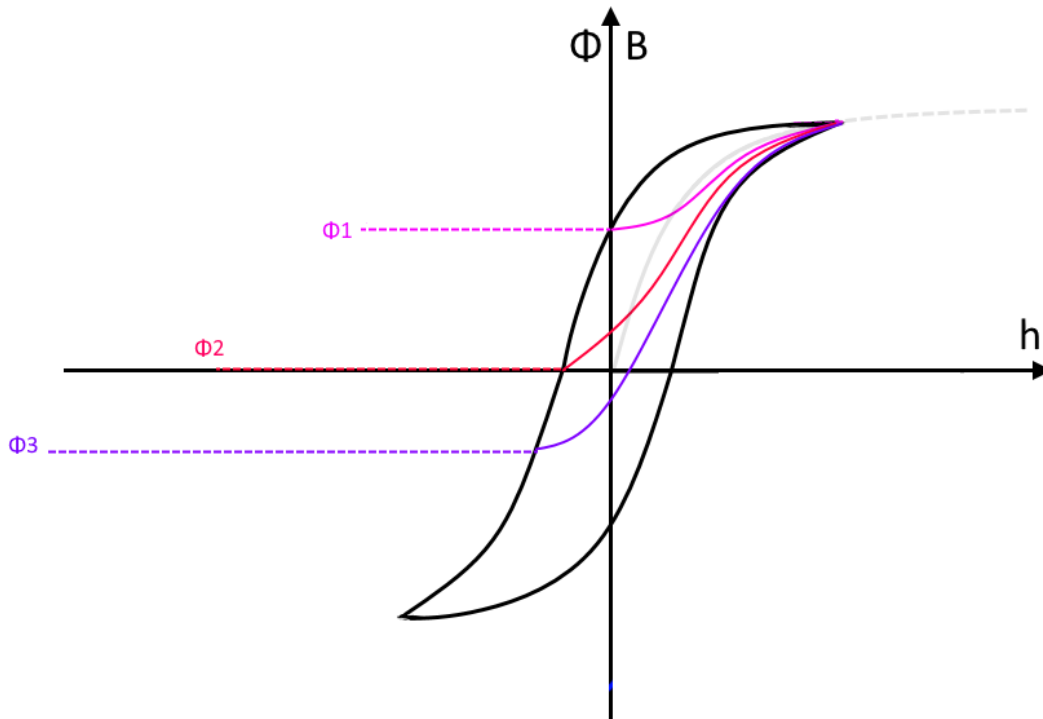
28. ábra: A vasmag hiszterézise

A 0 pontból indulunk. Mikor a vasmag betelít az 1 pontban, a gerjesztőáram csökkenni kezd. Ilyenkor nem 0 felé fog a görbe visszamozdulni, hanem a 2 pont felé. Mivel a gerjesztőáram szinuszos, ezért ez a másik irányba is megtörténik, így alakul ki a fent látható hiszterézisgörbe. Ha kisebb gerjesztési szintet érünk el, akkor a hiszterézis mérete is kisebb lesz.

Amikor bekapcsolunk egy transzformátort, a meginduló fluxus csúcsértéke az áramhoz hasonlóan minden periódusban egyre csökkenni fog. A vasmagban is kisebb lesz a telítődés mértéke, ezért a bekapcsolás után a hiszterézisgörbe keskenyedni fog, míg el nem éri az üresjárási állapotot:



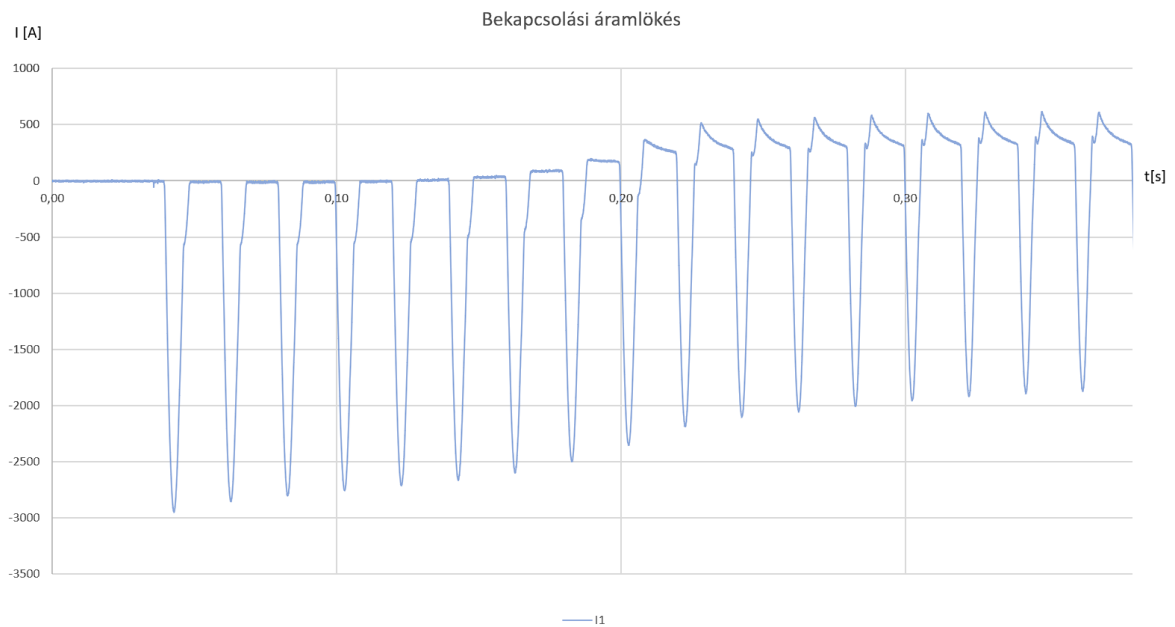
29. ábra: A hiszterézisgörbe változása a bekapcsolási áram lecsengése során



30. ábra: Fluxustól függő hiszterézisgörbe

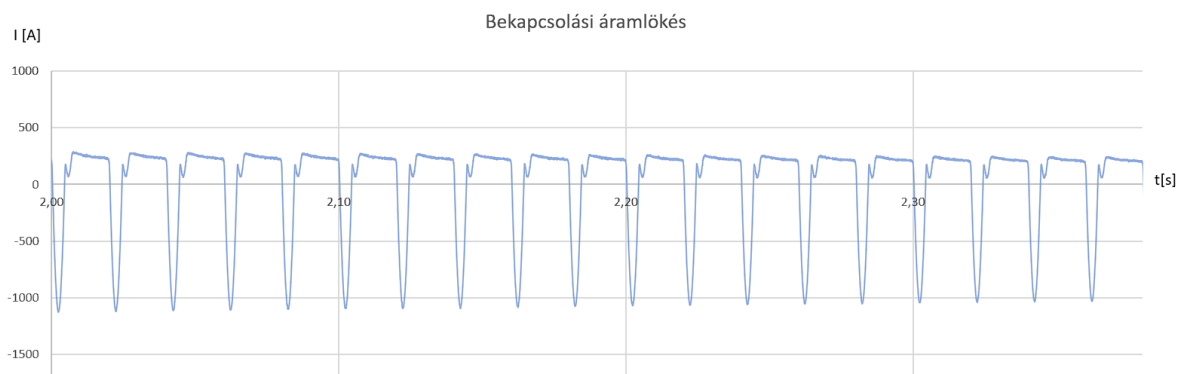
A következő esetek lehetségesek: Ha a fluxus annyira telítésbe hozza a vasmagot, hogy periódusonként a legalacsonyabb értéke nem éri el Φ_1 -et, akkor az áram sem éri el a nulla értéket, hanem a teljes áramperiódus pozitív oldalon helyezkedik el. Ezt az esetet a szoftver nem tudná számolni, mivel nem találná θ_s áram nullátmenet időpontját. Másik eset, mikor Φ_2 felett van a fluxus legkisebb periódusonkénti értéke. Amíg a fluxus alsó része Φ_1 és Φ_2 között van, addig a negatív áramcsúcs nagyon kicsi, szinte nem is látni, de idővel, ahogy csökken a fluxus, Φ_2 és Φ_3 közé kerül, nagyobb áramok alakulnak ki negatív irányba is. A fenti mérési eredményeknél is ez az eset következett be. Φ_3 alá nem kerülhet a fluxus alsó értéke, mert amint beáll a szimmetrikus szinuszos formába, ez lesz a legalacsonyabb pontja.

Az alsó mérési eredményen látható, hogy az első 6 periódusban a fluxus még nem érte el azt a szintet, hogy az ellentétes irányba is kialakulhasson az áram. A következő periódusokban azonban megjelenik egy csaknem 500A csúcsértékű áram, melynek a gyors felfutási ideje a hiszterézis egyenesebb bal oldala, a fűrészfog alakú lefutása pedig a görbébb, jobb oldala miatt jelenik meg. Mivel számolóprogram levágja a negatív részeit az áramnak, ezért számolás során információt erről nem kapunk.



31. ábra: Az ellentétes irányú áramok kialakulása bekapcsolás után

A 29. ábrán látható, hogy a görbe által körbezárt terület csökken, a vasmag kevésbé telítődik. A bekapcsolás után két másodperccel már csak 200A körüli ellentétes irányú áramok folynak a tekercsekben, miközben az áramcsúcsok még 1000A-nél is nagyobbak.



32. ábra: Az ellentétes irányú áramok bekapcsolás után 2 másodperccel

4. A rövidzárási feszültség és a bekapcsolási áramlökés közötti összefüggések

A drop, mint százalékos rövidzárási feszültség fontos szerepet tölt be a transzformátorok számítása során. Olyan számításokra használhatjuk, mint a szimmetrikus rövidzárási áram meghatározása. Ahhoz, hogy a rövidzárási áramot kiszámíthassuk, ismernünk kell a transzformátor névleges áramát, valamint a dropját. A rövidzárási áramot az

$$I_z = \frac{I_n}{\varepsilon_z}$$

képlettel számolhatjuk, ahol ε_z a drop. Látható, hogy minél nagyobb a drop, annál kisebb lesz a rövidzárási áram, tehát a két mennyiség fordítottan arányos egymással. Érdekes feltevés lehet, hogy vajon a bekapcsolási áramlökés áramát is csökkenti-e a drop.

Ebben a fejezetben a számoló szoftverrel fogunk számításokat végezni, melyeknek az eredményeit összehasonlítjuk a transzformátor dropjával. A vizsgált transzformátor adatai a következők lesznek:

Transzformátor adatai:		Hálózati adat:	Időszak: 0s -	
Névleges teljesítmény:	40000 kVA	Hálózat ellenállása:	0 Ohm	
Frekvencia:	50 Hz	Hálózat induktivitása:	0 H	
Indukció:	1.742 T	Időszak végpontja:		s
Remanencia:	80 % Bn		<<	>>
Menetfeszültség:	97.691 V			
Primer feszültség:	110 kV			
Bekapcsolási szög:	0 fok			
Kapcsolás:	YNy-Yyn primer YN			
Primer tekercs adatai:				
Áramsűrűség:	2.766 A/mm ²			
Belső átmérő:	627 mm			
Tekercselés redukált szélessége:	33.5 mm			
Tekercs mágneses magassága:	1428 mm			
Tekercs hőmérséklete:	20 C			
Tekercs anyaga:	<input checked="" type="radio"/> Réz <input type="radio"/> Alu			
<input type="button" value="Számol"/> <input type="button" value="Betölt"/>				

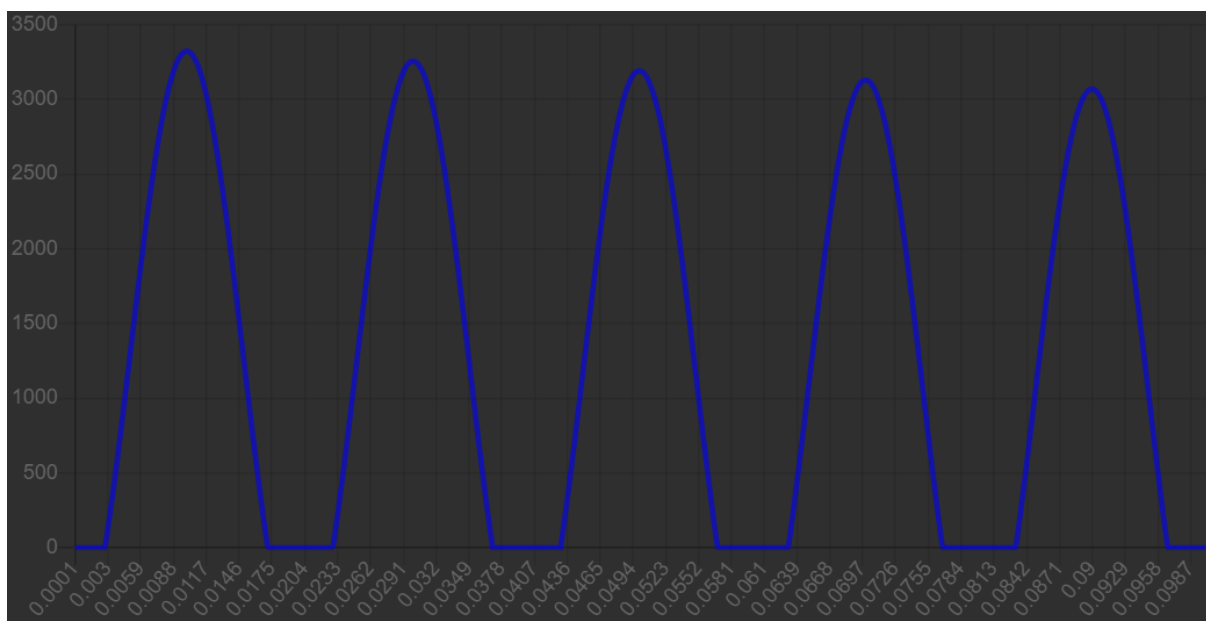
33. ábra: A vizsgált transzformátor adatai

A transzformátor dropját a korábban is említett drop képlet alapján számoljuk egy Excelben elkészített számolófüggvény segítségével.

W	314,15	Drop	0,102019
μ	1,26E-06		
lk	1,596		
fsz	0,1		
a1	0,085		
a2	0,1115		
ht	1,428		
Umenet	97,691		
Sn	40000000		

34. ábra: Drop számító Excel fájl

A képen látható értékek a bal oldalon a drop számításához bemenő adatok, a jobb oldalt pedig az ezekből számított drop látható, melynek a vizsgált transzformátor esetén közel 10%. A számítást lefuttatva az első pár periódusra:



35. ábra: Számított időfüggvény

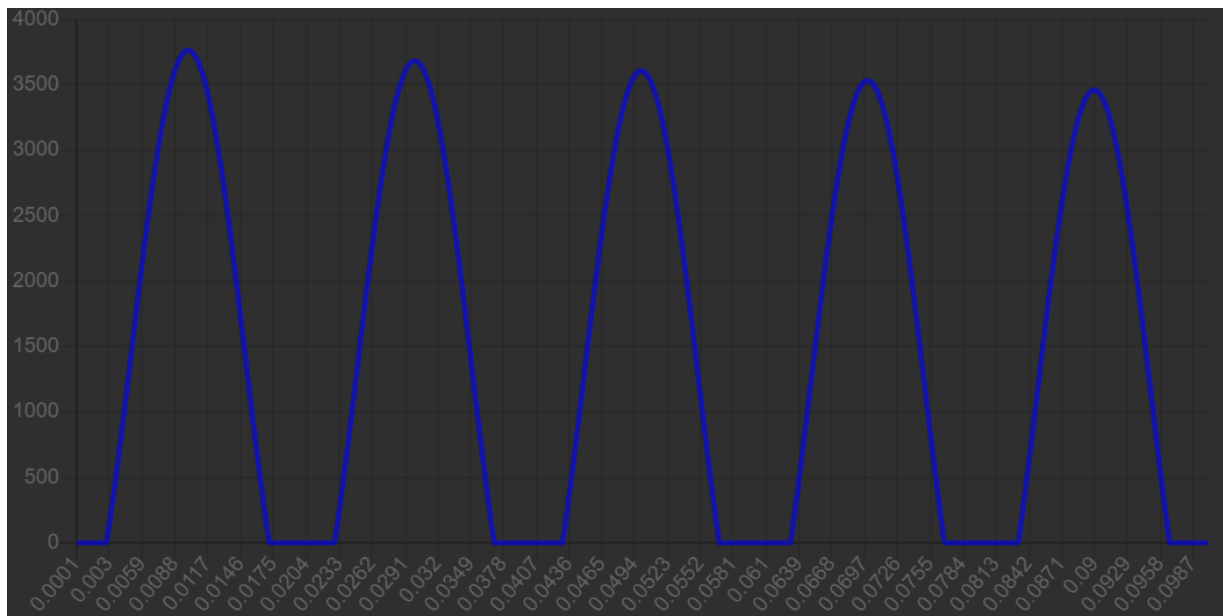
Leolvasható az eredményekből, hogy a bekapcsolási áramlökés első áramcsúcsa 3322,7 A lesz. A drop képletet elemezve láthatjuk, hogy a dropot mely tényezők befolyásolják. Ezek közül a frekvenciát, a tekercs magasságát, a menetfeszültséget, valamint a névleges teljesítményt tudjuk a számítóprogramban változtatni. Ezen paraméterek változtatása azonban tervezés során megköveteli más, ugyancsak a drop képletben szereplő paraméterek változtatását, ezért minden változtatásra egy teljesen más transzformátort kéne terveznünk, amivel nem tudnánk a drop és a bekapcsolási áramlökés közötti különbségeket meghatározni. Most először változtassuk meg a menetfeszültséget, ugyanis ez négyzetesen van súlyozva a képletben, így ez hozza a

legnagyobb változást a dropban. A menetfeszültség változtatásához ráadásul nem is kell áttervezni a transzformátorunkat, elég csak a kapocsfeszültséget növelni, vagy csökkenteni a drop változtatása érdekében.

W	314,15		Drop	0,090016
μ	1,26E-06			
lk	1,596			
fsz	0,1			
a1	0,085			
a2	0,1115			
ht	1,428			
Umenet	104			
Sn	40000000			

36. ábra: Számított drop menetfeszültség változtatása után

A menetfeszültséget 104V/menetre állítva a drop 9%-ra csökken. Ebben az esetben a következő eredményt kapjuk:



37. ábra: Számított áramfüggvény a menetfeszültség változtatás után

Látható, hogy a drop csökkenésével a bekapcsolási áramlökés növekszik, melynek értéke egészen pontosan 3763,3A. Ez 13,27%-os növekedésnek felel meg, ami kb. annyi, mint amennyivel a dropot csökkentettük. Pontosabb megállapítások érdekében további számításokat végzünk el, melyek eredményeit a következő táblázat tartalmazza:

Drop [%]	Drop _{10%} /Drop	Számított első csúcsáram [A]	Áram/ Áram _{10%}
19,8	0,51	1710	0,514
16	0,625	2122	0,638
12,6	0,793	2698	0,8191
8	1,275	4207	1,266
5	2	6697	2,014

A táblázat 2. és 3. oszlopa alapján megállapítható, hogy a drop fordítottan arányos a bekapcsolási áramlökéssel, amennyiben a menetfeszültséggel változtatjuk a dropot.

Most nézzük meg, hogy mi történik, ha a drop képletében szereplő más paramétereket változtatunk meg. Egyszerűen megváltoztatni egy paramétert a transzformátorban nem lehet, mert az új paraméter magával fogja húzni a transzformátor további paramétereit. Példaként növeljük meg a tekercsszélességet. Ebben az esetben nagyobb vezető keresztmetszet miatt lecsökken az áramsűrűség, ezért az áramsűrűség növelése érdekében csökkentjük a vezető magasságát, hogy a keresztmetszet visszaálljon. Ennek következménye az lesz, hogy a tekercs magassága csökkeni fog, így a drop a

$$\varepsilon_s = 2\pi f * \mu_0 * \frac{l_k * \left(\delta_{fsz} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right)}{h_t * U_{menet}^2} * \frac{S_n}{3}$$

képlet alapján nagyobb lesz, mivel a tekercsszélesség a tört számlálójában, a magasság a nevezőben van. Vizsgáljuk meg a tekercsszélesség hatását a bekapcsolási áramlökésre is. Az számítási leírásból kiderül, hogy a tekercs szélessége és a magassága a légmagos impedancia számolásához szükséges induktivitás és ellenállás számításánál volt felhasználva a

$$L_t = \frac{\pi^2(D + 2W_r)^2 * N^2}{10^{10} * H}$$

$$R_t = \frac{\pi(D + 3W_r) * N * \rho * j}{1000I_n}$$

összefüggések segítségével. A képletek alapján látszik, kisebb légmagos impedanciát, vagyis nagyobb áramot kapunk, ha növeljük a tekercsek szélességét, valamint csökkentjük a magasságát. Fontos kiemelni, hogy a bekapcsolási áramlökés esetében a légmagos impedanciát, míg a drop esetében a szórási impedanciát határozzák meg a tekercs geometriai méretei, melyek

ugyanabba az irányba, de más arányban változtatják meg a drop értékét, mint a bekapcsolási áramlökés nagyságát.

Elmondható tehát, hogy a magas, vékony tekercsek kis droppal, és nagy bekapcsolási áramlökéssel rendelkeznek, míg az alacsony, tömzsi tekercsekkel rendelkező transzformátoroknak a dropja nagyobb, bekapcsolási árama pedig kisebb.

5. Összefoglalás

Szakedolgozatomban bemutattam a transzformátort, mint áramköri elemet, felépítését, működését, felhasználási területeit, történelmi múltját. Elemeztem a bekapcsolási áramlökés okát, fizikáját, hatásait, valamint ismertettem a csillapítási módjait. Ismertettem a szakdolgozatom projekt feladatát, az áramlökés számító szoftver felhasználói felületét, működését, majd a következő fejezetben bemutattam a program által használt számolási elméletet. A későbbiekben foglalkoztam kapcsolási csoportokkal, majd az egyfázisú számítás elméletét átvittem a kapcsolási csoportok szerinti alkalmazásra. Leírtam a programkód működését, fontosabb részeit részletesen ismertettem.

A szakdolgozatom legérdekesebb és legizgalmasabb része a mérés volt, ahol 5 bekapcsolást és kikapcsolást mértünk le a transzformátoron. Ezekből hármat be is mutattam a szakdolgozat méréssel foglalkozó fejezetében. A mérésekből kiderült, hogy a program helyesen működik, azonban kihangsúlyozandó, hogy a program sok helyen a legrosszabb eshetőséget feltételezi, ezért egy transzformátor tervezésénél mindig 80% remanenciával és 0 bekapcsolási szöggel kell számolni! A szoftvert fejlesztés közben egy, a Ganz Transzformátor- és Villamos Forgógépgyártó Kft.-nél használt belga szoftver leírása és mérési eredményei alapján is tesztelni tudtam. A dolgozat végén kitértem a drop és a bekapcsolási áramlökés közötti összefüggésekre, melyet a szoftver alapján tett mérések alapján is kiértékeltem. A szoftveremet a jövőben szeretném továbbfejleszteni, ugyanis a belga program Windows 10 operációs rendszer alatt már nem fut tökéletesen, így szeretnék a cégnek egy működő, tesztelt szoftvert készíteni, mely aktívan használható transzformátorok tervezése során.

6. Summary

In my thesis, I presented the transformer as a circuit element, its structure, operation, areas of use, and its historical past. I analyzed the cause, physics, and effects of the magnetizing inrush current, as well as described the mitigation methods. I explained the task of my thesis project, the user interface and operation of the inrush current calculation software, and then in the next chapter I presented the calculation theory used by the program. Later on, I dealt with connection groups, and I transferred the theory of single-phase calculation to the application according to connection groups. I described the operation of the program code and explained its most important parts in detail.

The most interesting and exciting part of my thesis was the measurement, where we energized a transformer 5 times, and measured the inrush. I presented three of these in the chapter dealing with measurement of the thesis. The measurements showed that the program works correctly, but it should be emphasized that the program assumes the worst case in many places, therefore, when designing a transformer, we must always count on 80% remanence and 0 switching angle! During development, I was able to test the software on the basis of the description and measurement results of a Belgian software used at Ganz Transformers and Electric Rotating Machines Ltd. At the end of my thesis, I discussed the relationship between the drop and the inrush current, which I also evaluated based on the measurements made using the software. I would like to further develop my software in the future, because the Belgian program no longer runs perfectly under the Windows 10 operating system. I would like to create a working, tested software for the company, which can be actively used during the design of transformers.

7. Ábrajegyzék:

1. ábra: <https://edisontechcenter.org/Transformers.html>
2. ábra: Ganz fotó archívumból
3. ábra: Saját ábra
4. ábra: Dr. Karsai Károly, Dr. Kerényi Dénes, Dr. Kiss László – Nagytranszformátorok
2.22. ábra, 55. old.
5. ábra: Dr. Karsai Károly, Dr. Kerényi Dénes, Dr. Kiss László – Nagytranszformátorok
3.1 táblázat, 104. old.
6. ábra: Saját ábra
7. ábra: J.O. Aibangbee, S.O. Onohaebi - Power Transformer Differential Relay Inrush
Restraint Setting Applications figure 1.
8. ábra: Saját számítóprogramról készített képernyőmetszet
9. ábra: Saját ábra
10. ábra: Saját ábra
11. ábra: Saját ábra
12. ábra: Saját ábra
13. ábra: Saját ábra
14. ábra: Saját ábra
15. ábra: Saját ábra
16. ábra: Saját képernyőmetszet (Google Chrome forráskód megjelenítő)
17. ábra: Saját képernyőmetszet (Google Chrome forráskód megjelenítő)
18. ábra: Számítóprogramról készített képernyőmetszet
19. ábra: Számítóprogram eredményéről készített képernyőmetszet
20. ábra: A Fluke NORMA view szoftverről készített képernyőmetszet
21. ábra: Kiértékelt eredmények (Excel diagram)
22. ábra: Kiértékelt eredmények (Excel diagram)
23. ábra: Kiértékelt eredmények (Excel diagram)
24. ábra: Kiértékelt eredmények (Excel diagram)
25. ábra: Kiértékelt eredmények (Excel diagram)
26. ábra: Számítóprogram eredményéről készített képernyőmetszet
27. ábra: Kiértékelt eredmények (Excel diagram)
28. ábra: Saját ábra
29. ábra: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/4/480> figure 3

- 30. ábra: Saját ábra
- 31. ábra: Kiértékelt eredmények (Excel diagram)
- 32. ábra: Kiértékelt eredmények (Excel diagram)
- 33. ábra: Saját számítóprogramról készített képernyőmetszet
- 34. ábra: Saját Excel drop számolófájl, képernyőmetszet
- 35. ábra: Számítóprogram eredményéről készített képernyőmetszet
- 36. ábra: Saját Excel drop számolófájl, képernyőmetszet
- 37. ábra: Számítóprogram eredményéről készített képernyőmetszet

Felhasznált irodalom:

- [1] Dr. Karsai Károly, Dr. Kerényi Dénes, Dr. Kiss László – Nagytranszformátorok
- [2] <https://electrical-engineering-portal.com/the-worst-transformer-inrush-current-occurs-when>
- [3] <https://forumautomation.com/t/how-can-we-reduce-the-transformer-inrush-current/6441>
- [4] <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/4/480>
- [5] J.E. Holcomb - Distribution Transformer Magnetizing Inrush Current
- [6] Ganz Ansaldo Transzformátor tervezési segédlet ITT 31.997
- [7] Nicola Chiesa - Power Transformer Modeling for Inrush Current Calculation
- [8] Morteza Jamali, Mohammad Mirzaie, s. Asghar Gholamian - Calculation and Analysis of Transformer Inrush Current Based on Parameters of Transformer and Operating Conditions
- [9] J.O. Aibangbee, S.O. Onohaebi - Power Transformer Differential Relay Inrush Restraint Setting Applications
- [10] T.R. Specht - Transformer Magnetizing Inrush Current
- [11] Wulfo Schmidt - Über den Einschaltstrom bei Drehstromtransformatoren