

POTEZNA STRUJA TRANSFORMATORA

TRANSFORMER INRUSH CURRENT

Ivor Marković¹, Tomislav Đuran², Zvonimir Meštrović³

¹ Tehničko veleučilište u Zagrebu, predavač, Zagreb, Hrvatska

² Tehničko veleučilište u Zagrebu, asistent, Zagreb, Hrvatska

³ VERTIV CROATIA d.o.o., projektant, Zagreb, Hrvatska

Sažetak

U ovom radu opisani su fenomeni i problemi do kojih dolazi prilikom priključenja transformatora na elektroenergetsku mrežu. Prilikom direktnog priključenja transformatora na mrežu (čak i u praznom hodu) dolazi do pojave visokih tranzijentnih iznosa struje koja može imati razne negativne posljedice. Tranzijentna struja može imati iznos i do desetak puta veći od iznosa nazivne struje. Kako se radi o kratkotrajnoj pojavi (u pravilu nekoliko milisekundi), najčešće ne dolazi do trajne štete na samom transformatoru, ali može doći do prorade zaštite transformatora što otežava priključenje na mrežu što može dovesti do nestabilnosti sustava i gubitaka. U cilju dodatnog razjašnjenja opisane su metode spajanja. Obradena su 3 slučaja uključenja:

- uklapanje u trenutku kada valni oblik napona prolazi kroz nulu uz zaostali magnetizam
- uklapanje u trenutku kada valni oblik napona prolazi kroz maksimalnu vrijednost uz zaostali magnetizam
- uklapanje u trenutku kada valni oblik napona prolazi kroz maksimalnu vrijednost bez zaostalog magnetizama

Na kraju su još ukratko navedene i ostale uobičajene industrijske metode korištene kod uklapanja na mrežu.

Ključne riječi: transformator, potezna struja, demagnetizacija limova, magnetski tokinovatorstva, trokut znanja, organizacijska kultura, javno privatno partnerstvo, održivi razvoj

Abstract

This paper describes the phenomena and problems that arise when connecting the transformer to the power grid. When connecting the transformer to the grid (even in idle mode i.e. no load mode), high transient current flows occur, which can have various negative consequences. The transient inrush current can be up to tens of times higher than the nominal current. As this is a short-term occurrence, there is usually no permanent damage to the transformer itself, but protection of the transformer can be activated, which makes it difficult to switch on and results in losses. Also, 3 cases of inrush current were observed:

- connection of transformer to the grid in an instant when voltage is equal to zero and with remanent magnetic flux
- connection of transformer to the grid in an instant when voltage is equal to maximal value and with remanent magnetic flux
- connection of transformer to the grid in an instant when voltage is equal to maximal value and without remanent magnetic flux

In the end, the usual other industrial methods used in connection with the grid are briefly mentioned.

Key words: transformer, inrush current, lamination demagnetization, magnetic flux

1. Uvod

1. Introduction

Transformator je statički električni uređaj koji pretvara izmjenični napon jedne razine na drugu posredstvom magnetskog toka uz zadržavanje jednake frekvencije i snage. Također, bitno je naglasiti da je on neizostavni dio EES-a i nužan je za prijenos i distribuciju energije na veće razdaljine. Glavna pogonska stanja transformatora su uklop transformatora, rad u praznom hodu, rad pod teretom, rad u kratkom spoju i isključivanje transformatora. Moguće su i razne kombinacije spajanja više transformatora u jednu cjelinu. U ovom radu naglasak će biti na problemima koji se javljaju pri priključenju transformatora na mrežu. Naime, prilikom uklopa transformatora na mrežu dolazi do velike potezne struje pa često dolazi do prorade zaštite čime se prekida dovod električne energije do transformatora zbog čega dolazi do prekida u opskrbi električnom energijom te dolazi do gubitaka (vremena, zastoj u radu povezan s ostalim uređajima i slično). Za otkrivanje uzroka nastanka visoke potezne struje bitno je shvatiti princip rada samog transformatora. U ovom radu će, osim kratkog uvoda u princip rada transformatora i fenomena potezne struje biti prikazani i razni načini za njeno smanjenje i ublažavanje njenih posljedica.

2. Uklop transformatora i potezna struja

2. Switching on transformer and inrush current

Pri uklopu transformatora na mrežu, dolazi do pojave visokog iznosa tranzijentne struje. Struja koja tada potekne iz mreže kroz primarni namot naziva se potezna struja. Taj izraz označava najviši iznos ulazne struje do koje dolazi pri uključenju. Uobičajeno je ta pojava dovoljno kratka da ne ošteti transformator, ali može doći do neželjene prorade zaštite (nadstrujna zaštita) i isključenja transformatora što dovodi do prekida opskrbe električnom energijom.

Iz Faraday-evog zakona elektromagnetske indukcije (1) vidljiva je veza između inducirano napona i promjene magnetskog polja. Vidljivo je da će se napon inducirati jedino u slučaju kada se vodič nalazi u promjenjivom magnetskom polju što je i glavno ograničenje rada transformatora.

$$e(t) = \frac{d\Phi}{dt} = E_m \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$\Phi(t) = \int e(t) \cdot dt = \int E_m \sin(\omega t) \cdot dt = E_m \int \sin(\omega t) dt \quad (2)$$

gdje su:

$e(t)$ – inducirani napon [V],

E_m – maksimalna vrijednost inducirano napona [V]

$\Phi(t)$ – magnetski tok [Wb]

Kako je napon europske elektroenergetske mreže sinusnog oblika, a tok se dobiva integriranjem funkcije napona, može se vrlo lako primijetiti da će napon i magnetski tok biti sinusnog oblika i međusobno pomaknuti u fazi za 90° (slika 1). Faraday-ev zakon daje uvid u odnos između napona i magnetskog toka dok poopćeni Biot-Savartov zakon za zavojnicu prikazuje vezu između magnetskog toka i struje (3).

$$\Phi = \frac{N \cdot I}{l} \cdot \mu \cdot S \quad (3)$$

Φ – magnetski tok [Wb]

N – broj zavoja zavojnice,

I – jakost struje [A],

l – duljina magnetskog puta [m],

μ – permeabilnost magnetske jezgre [Vs/Am],

S – presjek magnetske jezgre [m²]

Iz jednadžbi (2) i (3) je primijetiti da će struja biti takvog oblika da stvori sinusni valni oblik magnetskog toka kao što je vidljivo na slici 1.



Slika 1 Trajno radno stanje: Magnetski tok i struja zaostaju za naponom za 90° el. [1]

Važno je napomenuti da slika 1 prikazuje idealizirani slučaj pri kojem je iznos permeabilnosti konstantan te su struja i magnetski tok jednakog oblika i razlikuju se jedino u amplitudi što u stvarnosti nije slučaj jer permeabilnost nije konstantna veličina i ovisi o iznosu jakosti magnetskog polja.

Jednadžba (2) može se zapisati i kao:

$$\Phi(t) = E_m \int \sin(\omega t + \alpha) dt \quad (4)$$

Nakon integriranja dobiva se jednadžba:

$$\Phi(t) = -\frac{E_m}{\omega} \cdot \cos(\omega t + \alpha) + \Phi_c \quad (5)$$

gdje je Φ_c konstanta integriranja. U trenutku $t=0$ vrijedi:

$$\Phi(0) = -\Phi_m \cos(\alpha) + \Phi_c \quad (6)$$

Gdje je $\Phi(0)$ početna vrijednost magnetskog toka i naziva se zaostali magnetski tok Φ_R . Slijedi:

$$\Phi_c = \Phi_R + \Phi_m \cos \alpha \quad (7)$$

Uvrštavanjem jednadžbe (7) u jednadžbu (5) dobivena jednadžba za tok u ovisnosti o vremenu :

$$\Phi(t) = -\Phi_m \cdot \cos(\omega t + \alpha) + \Phi_R + \Phi_m \cos \alpha \quad (8)$$

Važno je za primijetiti da će oblik magnetskog toka uvelike ovisiti o faktoru α koji označava trenutak (kut) priključenja transformatora na mrežu. Promatranjem jednadžbe (8) moguće je vidjeti kako će se magnetski tok mijenjati kroz vrijeme ovisno o trenutku uključenja na mrežu. U svrhu bolje preglednosti iznos magnetskog toka promatrati će se u tri vremenska trenutka i to u trenutku uključenja, trenutku koji odgovara kutu $\pi/2$ i trenutku koji odgovara kutu π . Također, uključenje transformatora promatra se za dva trenutka kad je napon pod kutem $\alpha=0$ i $\pi/2$.

Iznosi kuta α i vremena t iz tablice 1 se uvrštavaju u jednadžbu (8), a rezultat je prikazan u trećem i sedmom retku tablice 1.

Tablica 1 Ovisnost toka o vremenu t i kutu α

Table 1 Flux dependance on time t and angle α

1. slučaj: $\alpha=0$		
$t = 0$	$t = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{\omega}$	$t = \pi \cdot \frac{1}{\omega}$
$\Phi(0) = \Phi_R$	$\Phi(0) = \Phi_R + \Phi_m$	$\Phi(0) = \Phi_R + 2\Phi_m$
2. slučaj: $\alpha=\pi/2$		
$t = 0$	$t = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{\omega}$	$t = \pi \cdot \frac{1}{\omega}$
$\Phi(0) = \Phi_R$	$\Phi(0) = \Phi_R + \Phi_m$	$\Phi(0) = \Phi_R$

Vidljivo je da u slučaju priključenja transformatora kada iznos napona siječe os apcisa iznos magnetskog toka u trenutku koji odgovara kutu π jednak dvostrukoj vrijednosti maksimalnog magnetskog toka u normalnom pogonu uvećan za zaostali magnetski tok (označeno crveno u tablici 1). U slučaju da se transformator priključuje na mrežu u trenutku kada je iznos maksimalan ($\alpha=\pi/2$) do tranzijentne pojave ne dolazi te će maksimalni iznos magnetskog toka biti jednak maksimalnoj vrijednosti magnetskog toka u normalnom pogonu uvećanom za zaostali magnetski tok. Kako su transformatori većinom projektirani za

rad oko točke zasićenja koja se nalazi blizu ili ispod koljena na krivulji magnetiziranja, jasno je da bi za svako povećanje toka iznad nazivnog bilo potrebno drastično povećati protjecanje, odnosno potrebnu struju koja stvara taj magnetski tok. Kada je materijal u zasićenju, potrebni su veliki iznosi struje za male pomake u iznosu magnetske indukcije B . Kako bi se jezgra u tom slučaju uspjela magnetizirati, kroz namot primara poteku jako velike potezne struje (nekoliko desetaka puta veće) za ostvarivanje potrebnog toka (slika 2).



Slika 2 Prikaz povećanja toka i potezne struje (inrush current) za ostvarivanje zasićenja višeg od nazivnog. [2]

Iako je vršna vrijednost magnetskog toka dva puta veća od maksimalnog magnetskog toka u nazivnom radu (uvećanog za zaostali magnetski tok), struja je višestruko puta veća upravo zbog nelinearne krivulje magnetiziranja željezne jezgre transformatora do koje dolazi zbog smanjenja permeabilnosti magnetskog materijala uslijed zasićenja.

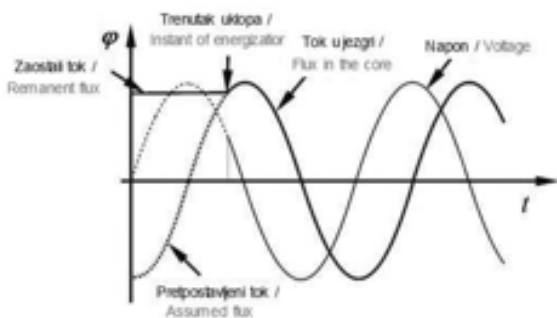
3. Standardne metode ograničavanja potezne struje

3. Standard methods for limiting inrush current

U nastavku će biti objašnjeno nekoliko najčešće upotrebljivanih metoda.

a) Određivanje optimalnog trenutka uklopa
Najpovoljniji trenutak uklopa je kada je pretpostavljeni tok koji bi bio u jezgri da je transformator uključen jednak zaostali magnetski toku.

b) Upravljeni uklop korištenjem pulsno širinske modulacije

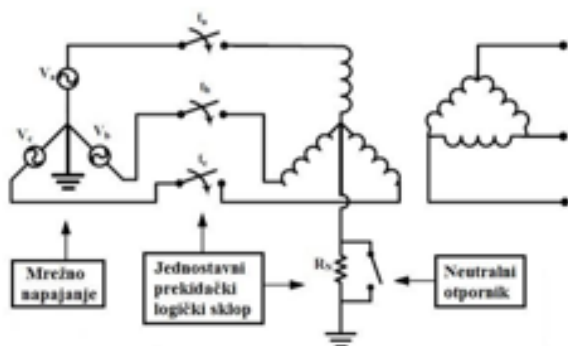


Slika 3 Idealni trenutak uklopa jednofaznog transformatora uz zaostali tok [7]

Metoda je ostvarena preko pretvarača sa pulсно širinskom modulacijom. Sa kompenzatorskim PWM (Pulse Width Modulation) načinom generiranja napona, struja uklopa se prigušuje, ali se također smanjuje i iskrivljenje harmonika. Kako je napon upravlján PWM-om, njegov se iznos upravljano smanjuje u vremenu sve dok modificiran napon ne dosegne iznos nula. U tom trenutku zna se da je stvoren magnet-ski tok izjednačen sa zaostalim magnetskim tokom pa nastupa propuštanje nepromijenjenog napona bez obzira na trenutnu vrijednost njegove sinusoide.

c) Sekvencijalno uklapanje faza transformatora

Ova metoda koristi otpornik optimalnog iznosa koji je spojen prema uzemljenju. Uklapanjem svake faze pojedinačno, neutralni se otpornik ponaša kao da je u serijskom spoju faze koja se uklapa te na taj način značajno smanjuje struju uklapanja tj. poteznu struju.

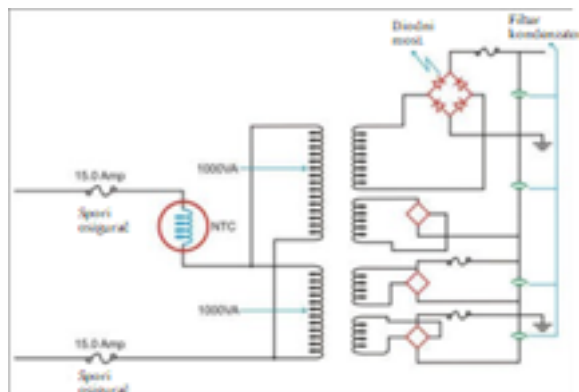


Slika 4 Shema sekvencijalnog uklopa faza transformatora s neutralnim otpornikom [8]

d) Limitiranje struje korištenjem temperaturno

osjetljivih otpornika (NTC sonda = negative temperature coefficient)

Karakteristika NTC otpornika je takva da porastom temperature zbog prolaska struje, iznos otpora pada. NTC otpornik se spaja serijski s primarnim namotom i zbog visokog početnog otpora ograničava početnu poteznu struju. Kako mu temperatura raste, otpor je sve manji i pad napona koji se događa na njemu postaje zanemariv i transformator može normalno raditi. NTC otpornik se odabire prema energiji koju mora biti u stanju disipirati na sebi i prema tome se odabire minimalni početni iznos otpora. Mana odabira NTC otpornika je potrebno vrijeme za hlađenje prije ponovnog uključivanja (cca 1 min).



Slika 5 Spajanje NTC otpornika na ulazni vod zbog ograničavanja potezne struje transformatora. [6]

e) Demagnetiziranje jezgre transformatora

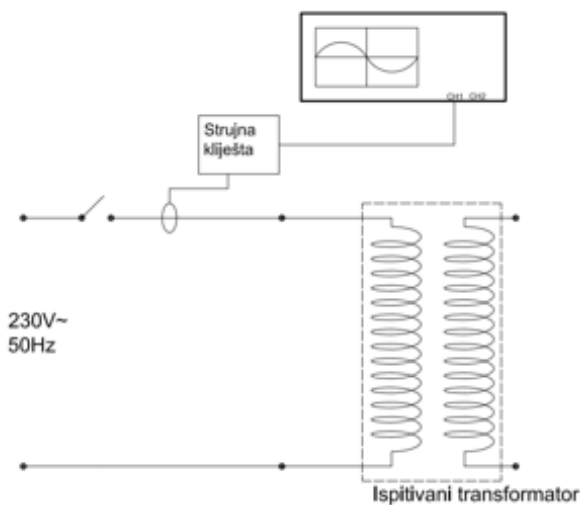
Prije uključivanja glavnog transformatora, pomoćnim regulacijskim transformatorom jezgra glavnog transformatora može se postupnim podizanjem napona magnetizirati i potom postupnim spuštanjem napona na nulu demagnetizirati. Time se zaostali magnetski tok poništava.

f) Projektiranje transformatora za manje potezne struje

- niže nazivno zasićenje odnosno manji magnetski tok. Može se postići većim brojem zavoja ili većim volumenom jezgre.
- veća rasipna reaktancija
- dizajn i smještaj namota
- specijalna geometrija i/ili B-H karakteristika jezgre

4. Rezultati mjerenja
4. Measurement results

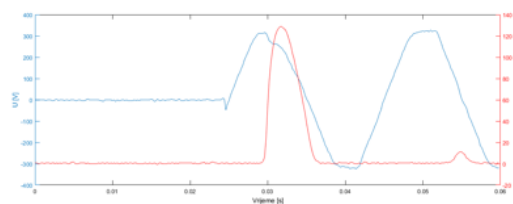
Kao što je vidljivo iz rezultata mjerenja, trenutak uključanja transformatora ima veliki utjecaj na iznos potezne struje transformatora. Vidljivo je da potezna struja ispitivanog transformatora u najnepovoljnijem slučaju iznosi i do 130 A dok pri povoljnom slučaju ona iznosi 27A. Osim trenutka uklopa transformatora potezna struja ovisi i o iznosu zaostalog magnetskog toka što je vidljivo iz rezultata trećeg pokusa gdje se priključak transformatora na mrežu dogodio u povoljnom trenutku uz demagnetiziranu magnetsku jezgru transformatora te se može primijetiti da potezna struja postiže najveći iznos od 1.6A što je i više nego prihvatljiva vrijednost. Također, zanimljivo je za primijetiti i propad napona do kojeg dolazi pri visokim iznosima potezne struje koja se događa u nepovoljnim trenucima uklopa transformatora na mrežu.



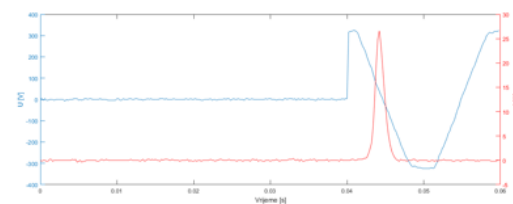
Slika 6 Shema spoja za mjerenje potezne struje transformatora

Tablica 2 Dostupni podaci ispitivanog transformatora
 Table 2 Available nameplate ratings of transformer

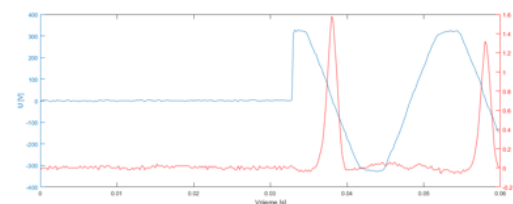
Nazivni podaci transformatora	
Napon	220 V
Snaga	2000 VA
Struja	9,09 A



Slika 7 Priključak transformatora na mrežu u trenutku prolaska napona kroz nulu i uz zaostali magnetski tok



Slika 8 Priključak transformatora na mrežu u trenutku kada je iznos napona maksimalan i uz zaostali magnetski tok



Slika 9 Priključak transformatora na mrežu u trenutku kada je iznos napona maksimalan i uz demagnetiziranu magnetsku jezgru (zaostali magnetski tok je jednak nuli)

5. Zaključak
5. Conclusion

U ovom radu opisane su pojave do kojih dolazi prilikom priključka transformatora na električnu mrežu. Pri uklopu transformatora na električnu mrežu dolazi do pojave potezne struje koja može imati vrijednost više desetaka puta veću od nazivne struje transformatora. Ta vrijednost uvelike ovisi o trenutku uklopa transformatora i o iznosu zaostalog magnetskog toka, ali također uvelike ovisi i o samoj konstrukciji transformatora. Daljnji tok istraživanja biti će usmjeren na otkrivanje i implementaciju metoda i sklopova za sigurni uklop transformatora na elektroenergetsku mrežu

6. References

6. Reference

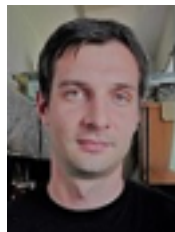
- [1] <http://electrical-engineering-portal.com/practical-considerations-of-transformer-inrush-current>, (Pristup 5.veljače 2018.)
- [2] <https://www.electrical4u.com/magnetizing-inrush-current-in-power-transformer/>, (Pristup 10.veljače 2018.)
- [3] <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2013/361643/>, (Pristup 10.veljače 2018.)
- [4] <https://www.ametherm.com/inrush-current/transformer-inrush-current.html>, (Pristup 5.veljače 2018.)
- [5] <https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/magnetic-hysteresis.html>, (Pristup 5.veljače 2018.)
- [6] <https://www.ametherm.com/blog/inrush-current/transformer-inrush-current-40va-transformer>, (Pristup 7.veljače 2018.)
- [7] O. Bego, G. Petrović, T. Kilić, , Smanjenje udarnih struja uklopa trofaznog energetskog transformatora; Energija, god. 57(2008), br. 3., str. 350-367
- [8] Sekvencijalni uklop faza transformatora <http://eejournal.ktu.lt/index.php/elt/article/viewFile/147/106> (Pristup 23.kolovoza 2017.)
- [9] Marko Hok, Načini smanjenja struje uklopa trofaznih transformatora, završni rad, Osijek: Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, 2017., 41 str.

AUTOR . AUTHOR



Ivor Marković rođen je 18. 10. 1988. godine u Zagrebu. Osnovnu i srednju školu pohađao je u Zagrebu. Preddiplomski i diplomski studij završio je 2012. godine na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, smjer Elektroenergetika. Trenutno radi kao predavač na Elektrotehničkom odjelu

Tehničkog veleučilišta u Zagrebu. Također, trenutno radi na doktorskom radu iz područja Električnih strojeva i tehnologija na fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu.



Tomislav Đuran je rođen u Zagrebu 2.12.1985. godine. U Zagrebu završava OŠ Luka i XV. gimnaziju (nekad MIOC). Upisuje 2004.godine Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilišta u Zagrebu. Diplomirao je 2009.godine. U Končar MES-u je radio u periodu 2010-2017 godine kao projektant elektromotora i kasnije voditelj poslova Projekta, Elektrotehnologije i Elektromotornih pogona. Na TVZ-u je zaposlen kao asistent od 2017.godine. Izvodi laboratorijske i auditorne vježbe iz kolegija: Električni strojevi 1 i 2, Transformatori, Elektromotorni pogoni Transformatori i električni strojevi.



Zvonimir Meštrović rođen je 21.8.1988. godine u Zagrebu. Osnovnu i srednju školu pohađao je u Zagrebu. Preddiplomski i diplomski studij završio je 2012. godine na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, smjer Elektroenergetika. Trenutno je zaposlen u tvrtci Vertiv d.o.o. Uz to, radi kao predavač vanjski suradnik na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu.