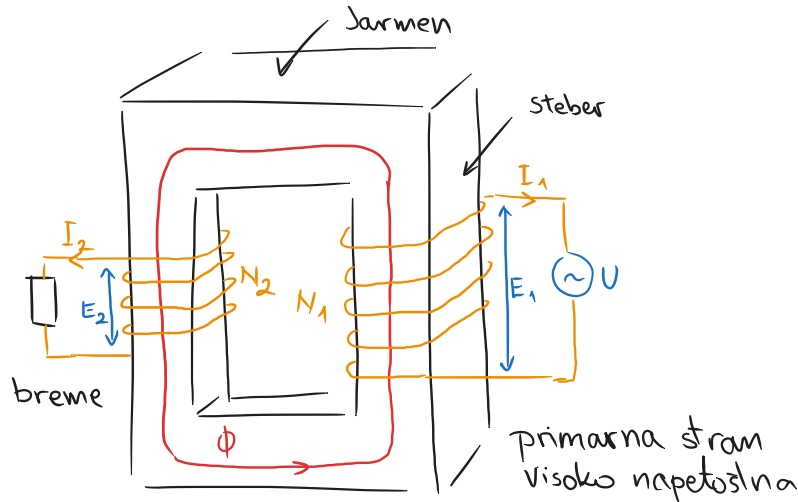


Struktura

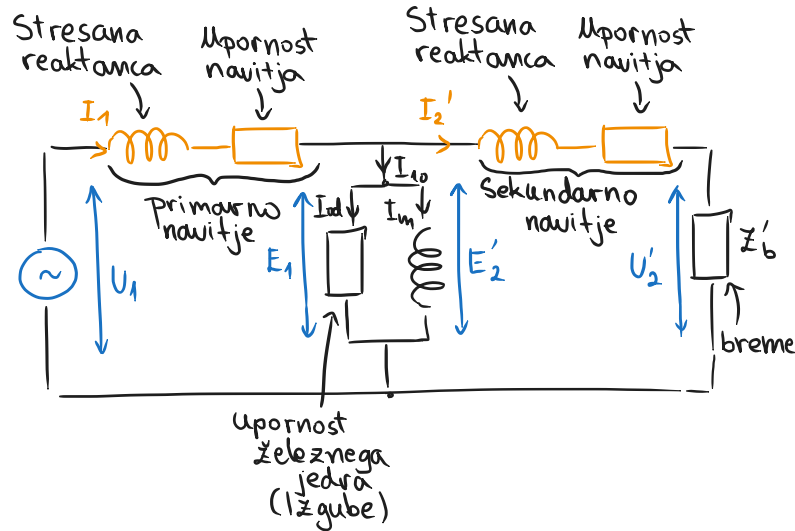
Transformatorji so pogosto sestavljeni iz stebra in jermena. Tipično to dosežemo z EI konstrukcijo, kjer vzamemo list železa iz katerega izrežemo dva I-ja tako da ostaneta dva E-ja.

Imamo lahko konstrukcijo, kjer sta obesi strani, visoko napetostna, in nizko napetostna na istem stebri. Tipično je visoko napetostna na zunanji strani zato da težje pride do preboja.



Nadomestno vezje

Nadomestno vezje je shema, ki nam pove, kje se nahajajo izgube v transformatorju.



$I_1 - I_2' \Rightarrow I_{10} = I_{0d} + I_m$ je tok prostega teka, ki magneti jedro in prinaša moč za izgube v železu.

$$E_1 = I_m 2\pi f \frac{L}{G_L} = I_m X_{GL}$$

I_{0d} je delovna komponenta toka prostega teka. $I_{0d} = \frac{P_{fe}}{E_1} = \frac{E_1}{R_{fe}}$. Kjer je $R_{fe} = \frac{E_1^2}{P_{fe}}$.

P_{fe} predstavlja skupek vseh izgub znotraj železnega jedra.

I_m je kompleksna komponenta toka prostega teka.

X_{gl} je $\frac{E_1}{I_m}$, kar predstavlja glavno induktivno upornosti transformatorja.

Ker železno jedro hrani magnetno polje, moramo to predstaviti z elementom, ki hrani energijo, zato izberemo tuljavo.

Redukcija

Ker transformator spreminja nivo napetosti, bi na nadomestnem vezju odpovedali [Kirchhoffovi zakoni](#), zato izvedemo redukcijo. To storimo za inducirane napetosti, ki se nahajata na sredini nadomestnega vezja, v tem primeru redukcija na primarno stran, tako kot je na zgornji shemi vezja:

$$E_1 = E'_2$$

Kjer je E_1 inducirana napetost na primarni strani transformatorja, E'_2 je pa reducirana inducirana napetost sekundarne strani. Pravo vrednost inducirane napetosti sekundarnega navitja se izračuna tako:

$$E'_2 = E_2 \frac{N_1}{N_2}$$

Zgornji dve enačbi vzamemo kot osnovo na nadaljnjo redukcijo drugih elementov v vezju.

$$\begin{aligned} I'_2 &= I_2 \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \\ R'_2 &= R_2 \frac{I_2^2}{I'^2_2} = R_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \\ X'_{L2} &= X_{L2} \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \\ X'_{C2} &= X_{C2} \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \\ Z'_b &= Z_b \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \end{aligned}$$

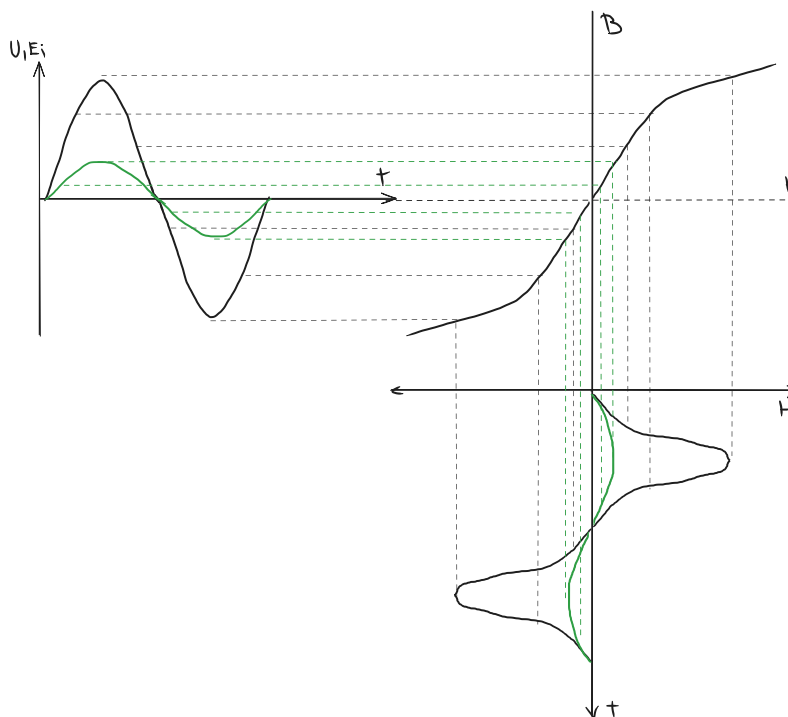
Pomembna lastnost redukcije je to, da se moč ohrani. Moč primarne strani je enaka pred i po redukciji, enako velja tudi za sekundarno stran. Tako se ohranijo moči, kar pomeni, da se ohranijo tudi izgubne moči. To je vidno v enačbi za redukcijo uporov.

Pozor, zgornji primeri so za redukcijo na primarno stran. To pomeni, da so vse napetosti in elementi v nadomestnem vezju prilagojene tako, da ustrezajo E_1 . Da se tudi reducirati na sekundarno stran, kjer je osnova za redukcijo E_2 . To storimo tako da, obrnemo ulomek v katerem ne nahaja število ovojev N_1 in N_2 .

Histerezne izgube

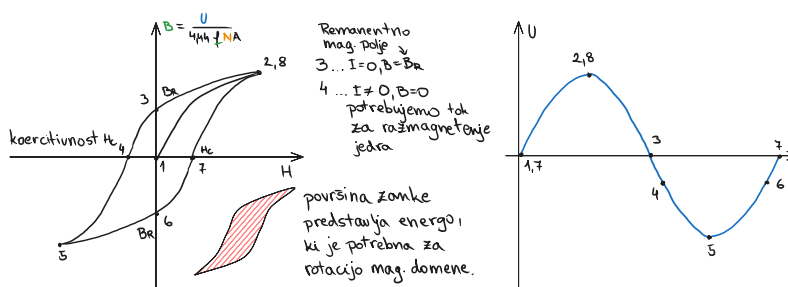
Za to razlago bomo predpostavili, da so sponke sekundarnega navitja odprte, posledično na sekundarni I_2 ne teče (prosti tek). Naslednja poenostavitev bo, da je inducirana napetost enaka napetosti generatorja/pritisnjena napetost.

$$U_1 = E_i = 4.44fN_1B \cdot A$$



Slika je zelo gosta, vendar nam pove veliko o magnetnem polju znotraj jedra. Levo zgoraj je sinusni potek napetosti generatorja U . Ta napetost se prevede v magnetno polje B s pomočjo [magične formule](#). Desno zgoraj je vidna [BH krivulja](#), ki prikazuje relacijo med magnetnim poljem B in jakost magnetnega polja H . Desno spodaj je narisana potek jakosti magnetnega polja skozi čas.

Z slike se da razbrati popačenje magnetnega polja, ki nastane zaradi nelinearnosti BH krivulje. S črno je narisana visoka napetosti, ki pripelje do visoke magnetnega polja B in posledično preide v nasičenje krivulje. Preide iz linearnega dela, čez koleno, kjer je krivulja veliko bolj položna. Z zeleno je označena nizka napetost, ki pa obdrži svojo sinusno obliko, kar nikoli ne preide izven linearnega območja.



Krivulja, ki se začne v izhodišču koordinatnega sistema, in potuje v točko 2, se imenuje deviška krivulja. Tako izgleda, ko prvič magnetimo železno jedro. Čez čas se krivulja spremeni, ker si magnetne domene "zapomnijo" kako so bile namagnetene. Posledica tega je, da imamo prisotno magnetno polje, tudi takrat, ko ga mi ne ustvarjamo samo. Ko je tok skozi tuljavo enak nič, je v jedru še vedno prisotno remanentno polje B_R . Velikost površine je odvisna od amplitude magnetenja.

$$P_h = K_h \frac{f}{50} \left(\frac{B}{1.5T} \right)^{\alpha_h} m_{fe}$$

Kjer je K_h specifična histerezna izguba v $\left[\frac{W}{kg} \right]$ železa pri frekvenci $50Hz$ in magnetnem polju $1.5T$, m_{fe} je masa železnega jedra.

Če vzamemo osenčeno površino, in jo pomnožimo z frekvenco magnetenja f , dobimo energijo na sekundo $\left[\frac{J}{s} = W \right]$, ki je moč histereznih izgub, ki se spreminja v toploto.

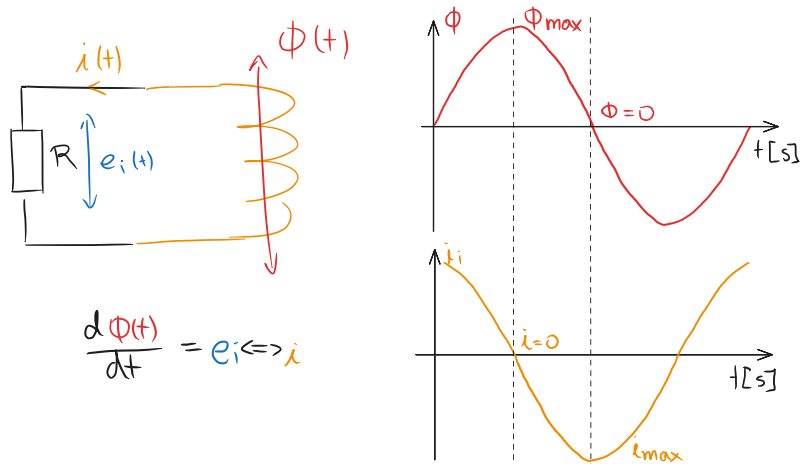
Vrtinčne izgube

Za lažje razumevanje si oglej [Lenzovo pravilo](#).

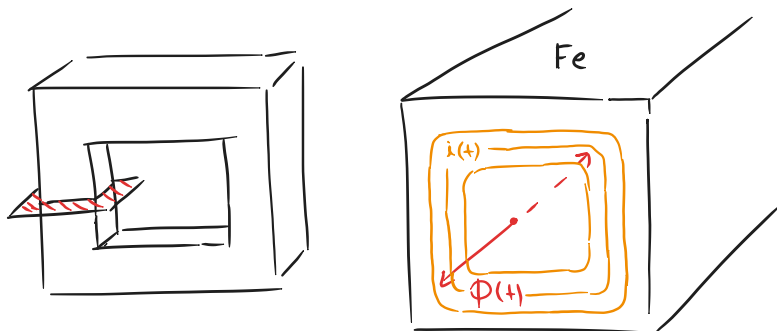
Ko imamo sklenjeno zanko, v kateri se spreminja magnetni fluks Φ , se v zanki inducira napetost, ki povzroči tok. Ta tok bo deloval tako, da bo skušal nasprotovati spremembi magnetnega polja, ki prehaja skozi zanko. Zanka se tako "upira" spremembi fluksa.

$$\frac{d\Phi(t)}{dt} = e_i$$

Tok bo največji, ko bo sprememba fluksa največja. Če se fluks spreminja sinusno, bo tok enak nič, ko bo fluks dosegel svojo maksimalno vrednost.

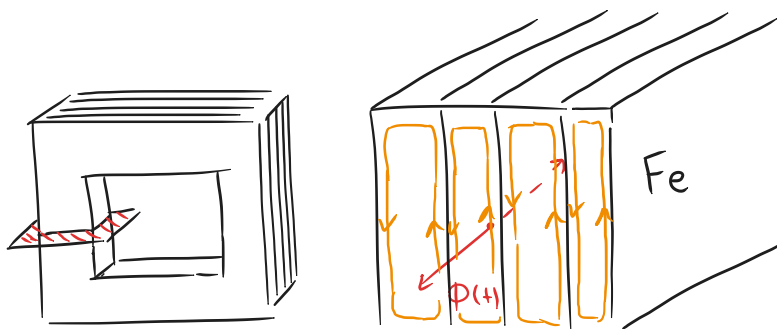


Zaradi sprememb fluksa se v železnem jedru inducirajo vrtilnični tokovi.



Da bi zmanjšali te vrtilnične tokove, prilagodimo konstrukcijo transformatorja. Namesto enega velikega železnega jedra uporabimo slojevito zgrajen transformator. Pločevine, ki imajo neprevodni zunanji sloj, zlagamo skupaj, kar ustvarja železno jedro z lamelami. Te lamele zmanjšajo nastanek vrtilničnih tokov, ker zmanjšajo velikost zank v jedru. Z drugimi besedami, zmanjšamo K_o so plasti jedra ločene, se poveča upornost za ustvarjanje in širjenje vrtilničnih tokov. Vsaka plast jedra deluje kot nekakšen "prekinjevalec" za vrtilnične tokove, ki so prisotni v jedru.

$$RI = R \uparrow I \downarrow$$



Vrtinčni tok i_{vr} je sorazmeren z inducirano napetostjo e_i , ta pa je sorazmerna z magnetnim poljem B in frekvenco f tako kot pravi magič formula.

Vrtinčne izgube P_{vrt} so sorazmerne z kvadratom vrtinčnih tokov I_{vr}^2 . Posledično lahko trdimo, da se izgube spreminjajo sorazmerno s kvadratom magnetnega polja B^2 in frekvence f^2 .

$$P_{ver} = K_{vr} \left(\frac{f}{50Hz} \right)^2 \left(\frac{B}{1.5T} \right)^2 m_{fe}$$

kjer je K_{vr} faktor materiala. Ta je odvisen od materiala jedra transformatorja. Enota je $\left[\frac{W}{kg} \right]$. Tipične debeline lamel so med 0.2 in 0.6 mm. Frekvenco f in magnetno polje B normiramo na standardne vrednosti $50Hz$ in $1.5T$ za običajno računanje izgub.

Izgube v navitju

TODO

To je treba znati za kratek stik.

Skupne izgube

K_{fe} je lastnost železa in je skupek K_{vr} in K_h .

$$P_{fe} = P_h + P_{vrt} = K_{fe} \frac{f}{50} \left(\frac{B}{1.5} \right)^{\alpha_n} m_{fe}$$

Izkoristek

$$\eta = \frac{P_{oddana}}{P_{sprejeta}} < 1$$