

V prvem koraku načrtovanja je potrebno na podlagi nazivne moči Q_n [kVAr] izbrati primerno ovojno napetost, ki jo za primer enofazne dušilke določimo glede na nazivno moč po obrazcu (1), pri tem je vrednost faktorja k odvisna od napetostnega nivoja, gostote toka v navitjih, gostote magnetnega pretoka v jedru, frekvence, cene izgub itd. V tem primeru je privzeta vrednost $k \sim 0,85$.

$$u_{ov} = k \cdot \sqrt{Q_n} \quad , \quad [V] \quad (1)$$

Enkrat, ko je ovojna napetost določena, je s tem določeno tudi število ovojov v navitju dušilke N (2):

$$N = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot u_{ov}} \quad (2)$$

Čisti presek magnetnega jedra S_{Fe} [cm²] je podan z obrazcem (3), na podlagi katerega se določi tudi premer stebra D_s [mm] (4), kjer k_{Fe} podaja polnilni faktor feromagnetnega jedra, ki zavzema vrednosti 0,80~0,93. Izpeljavo izraza (3) se nahaja v dodatku (A1), na koncu dokumenta.

$$S_{Fe} = \frac{45 \cdot u_{ov}}{B} \quad , \quad [cm^2] \quad (3)$$

$$D_s = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{Fe}}{\pi \cdot k_{Fe}}} \cdot 10 \quad , \quad [mm] \quad (4)$$

Nazivni tok dušilke se prav tako določi na podlagi nazivne moči in napetosti (5),

$$I_n = \frac{\sqrt{3} \cdot S_n}{U_n} \quad , \quad [A]. \quad (5)$$

Skupna debelina zračnih rež v jedru je prek Amperovega zakona podana z izrazom (6), pri tem je predpostavljeno, da je padec magnetne napetosti na magnetnem jedru zanemarljiv:

$$\sum \delta = \frac{\sqrt{2} I_n \cdot N \cdot \mu_0 \cdot f_f}{B} \cdot 1000 \quad , \quad [mm], \quad (6)$$

kjer f_f predstavlja korekcijski faktor, ki zajema t.i. robni efekt oz. nehomogenost magnetnega polja v zračni reži in je odvisen od višine zračne reže, njegova vrednost pa je približno 1,2; zanj se pogosto uporablja izraz Carterjev faktor. Zaradi robnega efekta in posledičnih dodatnih izgub ter zaradi tehnoloških razlogov, se prej dobljena vrednost zračne reže doseže tako, da se enakomerno razdeli vzdolž stebra. Pri tem je vnaprej potrebno določiti bodisi debelino posamezne reže Δ [mm] ali pa število rež v stebru n . V našem primeru bomo privzeli, da je debelina posamezne reže znana. Število potrebnih zračnih rež je potemtakem določljivo z enačbo (7)

$$n = \frac{\sum \delta}{\Delta} \quad (7)$$

Smiselno je debelino posamezne reže izbrati tako, da je n celoštevilčna vrednost. Po navadi je izbira števila rež pogojena s tehnološkimi omejitvami in zahtevi. Namreč, večje število manjših rež zahteva več delovnih ur pri izdelavi in sestavi enote. Po drugi strani, pa se pri večjem številu rež da induktivnost bolj natančno umeriti na želeno vrednost. Potrebno je omeniti še, da se pri manjših zračnih režah ni tako izrazite razširitve magnetnega polja vzdolž jedra in so posledično tudi dodatne izgube v navitjih bistveno nižje. Kakorkoli, odločitev o višini in številu rež je zmeraj stvar tehnološko ekonomskega kompromisa.

Ob predpostavki, da se ampérni ovoji porabijo le za magnetenje zračnih rež, bo pričakovana induktivnost dušilke določljiva z enačbo (8),

$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot S_{Fe}}{10 \cdot n \cdot \Delta} \quad , \quad [H] \quad (8)$$

pri tem je μ_0 permeabilnost praznega prostora (zraka), S_{Fe} in Δ pa sta podana v že omenjenih enotah cm² in mm.

Višino stebra b_s [mm] lahko določimo glede na premer stebra D_s [mm] (9). Kot bo vidno v nadaljevanju, je ugodno izbrati nekoliko višji steber in s tem nekoliko višje navitje, saj bo s tako izbiro debelina navitja a_t manjša. Zaradi tehnoloških, pa tudi tehničnih in ekonomskih razlogov, je priporočljiva debelina navitja med 70 in 110 mm. Omenjene omejitve veljajo za enofazne enote moči med 1 in 15 MVar.

$$b_s = 3 \cdot D_s \quad , \quad [mm] \quad (9)$$

V magnetnem jedru z zračnimi režami je potrebno doreči še zadnji parameter in sicer višino koluta h_{kol} [mm], ki ga izračunamo z enačbo (10).

$$h_{kol} = \frac{b_s - \sum \delta}{n - 1} \quad , \quad [mm]. \quad (10)$$

S tem zadnjim parametrom je osnovni izračun magnetnega jedra zaokrožen, potrebno je izračunati še navitje, težo potrebnega materiala in izgube v magnetnem jedru ter navitjih.

Geometrijska višin navitja b_g [mm] je že pravzaprav določena z višino stebra (11)

$$b_g = b_s - \delta_{sp} - \delta_{zg} \quad , \quad [mm], \quad (11)$$

kjer sta δ_{sp} in δ_{zg} razdalji navitja do spodnjega oz. zgornjega jarma podani v mm.

Presek ovoja (čisti presek ovoja, brez izolacije) v navitju S_{cu} [mm²], je potrebno izbrati tako, da tokovna gostota g [A/mm²] ne preseže predpisane vrednosti (12)

$$S_{cu} = \frac{I_n}{g} \quad , \quad [mm^2]. \quad (12)$$

Navitje VN dušilke je praviloma zvrnjenega ali pa prepletenega tipa. Pri takem tipu navitja je polnilni faktor približno $f_p \sim 0,4$ in nam pove razmerje med čistim presekom bakra v navitju $N \cdot S_{cu}$ in produktom

$a_t \cdot b_g$. Iz slednjega razmerja lahko izračunamo debelino navitja a_t [mm] (13).

$$a_t = \frac{N \cdot S_{cu}}{b_g \cdot f_p} , \quad [\text{mm}]. \quad (13)$$

Z ozirom na sliko 1 je masa vgrajenega bakra v dušilki določljiva z izrazom (14).

$$m_{cu} = 28 \cdot (D_s + 2\delta_{01} + a_t) \cdot S_{cu} \cdot N \cdot 10^{-6}, [\text{kg}] \quad (14)$$

kjer δ_{01} predstavlja razdaljo med navitjem in stebrom (slika 1). Dimenzije D_s , δ_{01} in a_t , so podane v mm, S_{cu} pa v mm^2 .

Masa magnetne pločevine m_{Fe} [kg] ob privzeti polovičnem preseku jarmov in stranskih stebrov je podana z izrazom (15)

$$m_{Fe} = 7,65 \cdot S_{Fe} \cdot 10^{-4} \cdot (2D_s + 2\delta_{01} + 2\delta_{10} + 2a_t + 2b_s - \Sigma\delta), \quad [\text{kg}], \quad (15)$$

pri tem so vrednosti v oklepaju podane v mm, presek magnetnega jedra S_{Fe} pa v cm^2 .

Izgube v navitju se izražajo prek mase navitja m_{cu} [kg] in gostote električnega toka g [A/mm^2] ter dodatnih izgub, ki so zajete v faktorju dodatnih izgub f_{dod} (16). Zaradi prisotnosti zračnih rež v jedru, je faktor dodatnih izgub občutno večji, kot pa pri energetskih transformatorjih in dosega vrednost $f_{dod} \sim 1,5$ [3].

$$P_k = m_{cu} \cdot g^2 \cdot 2,36 \cdot f_{dod} , \quad [\text{W}] \quad (16)$$

Zgornja enačba drži za bakreno navitje pri 75°C . Izpeljava enačbe (16) je podana v dodatku (A2).

Izgube v magnetnem jedru so prav tako odvisne od mase magnetne pločevine m_{Fe} [kg] v jedru in specifičnih izgub p_0 [W/kg], ki so odvisne od tipa uporabljene pločevine in gostote magnetnega pretoka v jedru B (17). Za lasersko obdelano pločevino debeline lamel 0,27 mm so pri 1,2 T specifične izgube približno $p_0 \sim 0,6$ W/kg.

$$P_0 = m_{Fe} \cdot p_0 , \quad [\text{W}] \quad (17)$$

3 Ekonomsko ovrednotenje VN dušilke

Pri ekonomski evalvaciji dušilke, se postopa podobno, kot pri transformatorju in sicer, nabavni ceni, ki zajema ceno vgrajenega materiala, dela in opreme, je potrebno dodati še strošek izgub. Podrobne stroškovne analize na tem mestu ne bomo izvajali, podane bodo le okvirne smernice za izračun lastne cene dušilke. Privzeto bo, da je razmerje med ceno bakra in magnetne pločevine ~ 3 ter da je delež v lastni ceni, ki se nanaša na delo približno 30%. S temi predpostavkami in ob upoštevanju trenutnih cen bakrene žice ter magnetne pločevine, bi ocenjena vrednost lastne cene dušilke bila (18) :

$$C_d = c_d \cdot m_d \cdot 1,3 , \quad [€], \quad (18)$$

kjer C_d predstavlja lastno ceno dušilke [€], c_d specifično ceno dušilke na enoto teže, ki je v razponu med 6 in 8

[€/kg], m_d pa težo dušilke [kg], ki je približno podana z izrazom $m_d \approx 1,6 \cdot (m_{cu} + m_{Fe})$.

Ekonomska cena dušilke, ki upošteva še ceno (stroške) izgub je podana s spodnjo enačbo (19). Pri transformatorjih je izraz (19) poznan kot »Total Owning Cost«, ali krajše kar TOC, zato je tudi tukaj uporabljeno enako poimenovanje, čeprav se nanaša na dušilko.

$$TOC = C_d + X(P_0 + P_k) , \quad [€] \quad (19)$$

Faktor X je t.i. evalvacijski faktor, ki pove, kolikšen strošek predstavlja kupcu 1kW izgub. Izračun vrednosti X lahko bralec zasledí v literaturi [2,6].

4 Rezultati izračuna

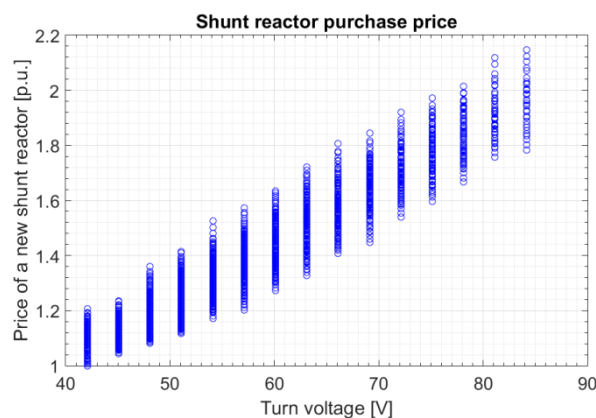
Na podlagi prej opisanih postopkov, je bila izračunana optimalna konstrukcija enofazne dušilke z nazivnimi podatki v tabeli 1.

Tabela 1: Nazivni podatki enofazne kompenzacijske dušilke jedrnega tipa

parameter	vrednost	opis
Q_n	5000 kVA	Nazivna moč
U_n	110 kV	Nazivna napetost
I_n	78,73 A	Nazivni tok
št. faz	1	Število faz
f	50 Hz	frekvenca

Pri izračunih so bili v spodaj navedenih mejah variirani sledeči parametri: u_{ov} , B , g , h_{kol} in Δ .

$42 < u_{ov} < 84$	V
$1,0 < B < 1,4$	T
$1,2 < g < 2,2$	A/mm^2
$100 < h_{kol} < 200$	mm
$10 < \Delta < 20$	mm

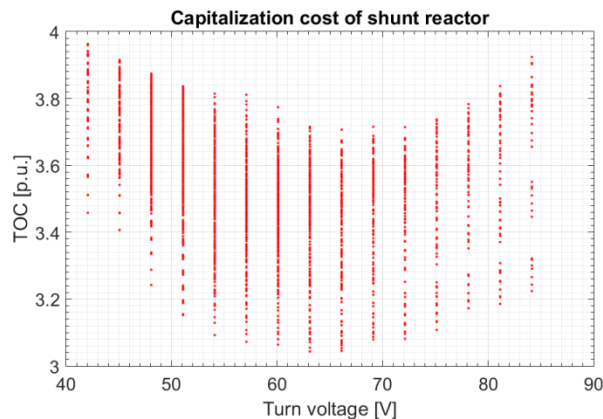


Slika 2: Prikaz lastne cene dušilke v odvisnosti od ovojne napetosti

Slika 2 prikazuje lastno ceno enofazne dušilke brez upoštevanja stroškov izgub, pri tem so cene podane v p.u. oz. normirane na najnižjo lastno ceno. Iz slike je

prav tako razvidno, da se cenejše dušilke projektirajo pri nižjih ovojnih napetostih.

Z upoštevanjem cene izgub se optimalna rešitev pomakne k višjim vrednostim ovojne napetosti. Rezultati izračuna optimalne konstrukcije na podlagi evalvirane cene TOC kaže slika 3. Tudi v tem primeru so vrednosti normirane z najnižjo lastno ceno.



Slika 3: Prikaz evalvirane cene dušilke v odvisnosti od ovojne napetosti

Slika kaže konvexno odvisnost cene glede na ovojno napetost, kjer se optimalna izbira nahaja med 60 V in 70 V. S stališča načrtovanja je zelo pomembno, da je na voljo več rešitev, ki se le malo razlikujejo glede na najcenejšo izbiro, kar omogoča opredelitev za tehnično najustreznejšo rešitev.

Primerjava vrednosti parametrov najcenejše in najbolj ekonomične konstrukcije je podana v tabeli 2. Če se na tem mestu ozremo le na ekonomsko vrednost investicije, vidimo, da najcenejša dušilka pomeni skozi življenjsko dobo (~ 40 let) občutno dražjo izbiro, kot pa najbolj ekonomična dušilka.

Tabela 2: Primerjava optimalnih parametrov najcenejše in najbolj ekonomične konstrukcije dušilke

parameter	Enota	Najcenejša dušilka	Najbolj ekonomična dušilka
u_{ov}	V	42,1	63,1
B	T	1,30	1,17
g	A/mm ²	2,2	1,27
h_{kol}	mm	100	125
Δ	mm	12,5	10
S_{cu}	mm ²	35,8	61,9
b_g	mm	1254	1422
a_t	mm	108	110
b_s	mm	1654	1820
N		1510	1006
n		16	14
D_s	mm	460	590
m_{Fe}	kg	7018	13281
m_{Cu}	kg	1101	1500
m_d	kg	13470	23322
$\sum \delta$	mm	195	144
P_0	W	3937	1758
P_k	W	19802	9013
L	H	2,569	2,569

Lastna cena	p.u.	1,00	1,71
TOC	p.u.	3,94	3,04

5 Zaključek

V članku so predstavljeni osnovni koraki za izračunu visokonapetostne dušilke jedrnega tipa brez regulacijskih zmožnosti. Podane so tudi smernice za ekonomsko ovrednotenje dušilke, na podlagi česa se izbere najprimernejšo konstrukcijsko rešitev. Čeprav se podani računski postopki temeljijo na analitičnih izrazih, pa je pri bolj resnem pristopu k projektiranju takšnih naprav potrebno uporabiti numerične postopke, saj je zaradi prisotnosti zračnih rež magnetno polje v oknu dušilke zelo izrazito in povzroča nemajhne dodatne izgube v električno prevodnih konstrukcijskih delih.

Literatura

- [1] C. T. Bengtsson, J. A. Kern (2020), "Shunt reactors improve voltage stability and power quality", *Transformers Magazine*, vol. 7, no. 1, pp 78-82
- [2] »Transformer handbook 3th ed.«, ABB, 2007.
- [3] K. Lenasi, M. Berlec, D. Makuc (2001), "Tonfrekvenčni Transformator", *Sloko Cigre* 2001, 12-1-8
- [4] K. Karsai, D. Kerényi, L. Kiss, *Large Power Transformers*, Budapest: Académia Kiadó, 1987.
- [5] A. Dolenc, »Transformatorji«, Učbenik, Univerza v Ljubljani - Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 1970.
- [6] M. Trbušić, I. Lugarič, M. Jesenik, M. Trlep, A. Hamler (2021), "Izbira materialov za visokoučinkovite distribucijske transformatorje", *ERK 2021*, Portorož, pp 230-233

Dodatek

Izpeljava izraza za inducirano napetost oz. čisti presek presek magnetnega jedra (enačba 3 v članku). Pri tem je upoštevana vrednost omrežne frekvence $f = 50$ Hz

$$\sqrt{2} u_{ov} = \frac{d}{dt} \int_{S_{fe}} B \sin(2\pi f t) dS, \quad (A1)$$

$$u_{ov} = \frac{2\pi f B S_{fe}}{\sqrt{2}} \rightarrow S_{fe} = \frac{45 u_{ov}}{B}, [\text{cm}^2]$$

Formula za izračun izgub v bakrenem navitju zaradi toka (enačba 16 v članku) je izpeljana kot sledi; pri tem je upoštevana vrednost električne prevodnosti bakra σ_{cu} pri 75°C, ki je $\sigma_{cu} = 0,0216 \Omega\text{m}$ in gostota bakra $\rho_{cu} = 8,9 \text{ kg/dm}$.

$$P_k = R_{cu} I^2 = \sigma_{cu} \frac{l}{S_{cu}} g^2 S_{cu}^2 = m_{cu} \cdot g^2 \cdot 2,36, [\text{W}] \quad (A2)$$

V zgornji izpeljavi je masa bakra izražena kot produkt gostote in volumna $m_{cu} = \rho_{cu} l S_{cu}$, pri tem se l [m] nanaša na dolžino navitja, S_{cu} [mm²] pa na presek navitja.