

Híradástechnikai hálózati transzformátorok tekercsjellemzőinek optimalizálása

PFLIEGEL PÉTER
BME
Híradástechnikai
Elektronika Intézet

BEVEZETÉS

Transzformátorok méretezéséhez a műszaki előírásokon kívül adott a szabványos magtípusok és huzalok méretválasztéka. A mag- és a huzalméretet diszkrét értékei miatt a gyakorlatban általában valamivel nagyobb méretet kell választanunk, mint amekkorára az előírások teljesítéséhez szükséges.

A műszaki előírásokat kielégítő legkisebb magméret kiválasztásának módszere az irodalomból ismert [2, 3]. Ezt az eljárást a transzformátorok melegezésének vizsgálata során kapott eredményekkel pontosítottuk [4]. Az eszerint kiválasztott magméret további csökkentésére nincs lehetőség, a tekercsjellemzők számítása azonban a számítógépes tervezés adta lehetőségek kihasználásával több szempont szerint optimalizálható. Jelen cikkben a tekercselés háromféle optimalizálási lehetőségét és azok megvalósításának módját mutatjuk be:

1. minimális rézfelhasználásra való optimalizálás,
2. minimális veszteségre való optimalizálás,
3. technológiai optimalizálás.

Mivel az optimalizálandó célfüggvények a független változók diszkrét volta miatt nem folytonosak, ezért a szokásos optimalizálási eljárások nem alkalmazhatók. Az optimalizálás lényege itt mindhárom esetben a transzformátortekercsek huzalátmérőinek megfelelő algoritmus szerinti kiválasztása a szabványos méretválasztékból.

A korábbi méretezési eljárás [2] alapján szerkesztett programot [3] kibővítettük az itt ismertetett optimalizálási variánsokkal, illetve a melegedésvizsgálat során nyert eredményekkel [1]. Az optimalizálások működését mintapéldák futtatási eredményeivel szemléltetjük.

MINIMÁLIS RÉZFELHASZNÁLÁS

Vizsgáljuk meg, hogy a minimális rézfelhasználás érdekében milyen legyen az egyes tekercs huzalvezetései aránya. A kérdés átfogalmazható úgy is, hogy milyen arányban kell a megengedett rézvesztésgéi teljesítménynek megoszlania a tekercs között ahhoz, hogy a részteljesítmények összege a minimális legyen.

Tételezzük fel először, hogy a transzformátor csak két tekercsből áll. Az eredő rézvesztés ez esetben:

$$P_r = I_1^2 \frac{\rho_1 n_1 l_1}{A_{r1}} + I_2^2 \frac{\rho_2 n_2 l_2}{A_{r2}}, \quad (1)$$

ahol:

I_1, I_2 a tekercsen átfolyó áramok effektív értéke,
 ρ_1, ρ_2 a huzalanyag (hőfokfüggő) fajlagos ellenállása,

n_1, n_2 a tekercs menetszáma,

l_1, l_2 a tekercs közepes menethossza,

A_{r1}, A_{r2} a huzalok rézkeresztmetszete.

A két tekercs hőmérsékletét és közepes menethosszát azonosnak véve, valamint a menetszámokkal bővítve:

$$P_r = \rho l_k \left[\frac{(n_1 I_1)^2}{n_1 A_{r1}} + \frac{(n_2 I_2)^2}{n_2 A_{r2}} \right]. \quad (2)$$

A számlálóban levő menetszámokat az indukciótörvényből helyettesítve:

$$P_r = \frac{2 \rho l_k}{(\omega A_m B_1)^2} \left[\frac{(U_1 I_1)^2}{n_1 A_{r1}} + \frac{(U_2 I_2)^2}{n_2 A_{r2}} \right]. \quad (3)$$

Bevezetve az

$$\varepsilon_1 = \frac{n_1 A_{r1}}{\sum_{j=1}^2 n_j A_{rj}}, \quad \gamma_1 = \frac{U_1 I_1}{\sum_{j=1}^2 U_j I_j},$$

$$P_{\varepsilon_1} = \frac{2 \rho l_k (U_1 I_1)^2}{(\omega A_m B_1)^2 \sum_{j=1}^2 n_j A_{rj}} \quad (4)$$

jelöléseket:

$$P_r = P_{\varepsilon_1} \left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{\left(\frac{1}{\gamma_1} - 1 \right)^2}{1 - \varepsilon_1} \right]. \quad (5)$$

Az [5] kifejezésnek $\varepsilon_1 = \gamma_1$ esetén minimuma van, aminek értéke: $P_{rm} = P_{\varepsilon_1} / \gamma_1^2$.

Terjesszük ki a fenti gondolatmenetet több tekercsre. Az eredő rézvesztés ez esetben:

$$P_r = \frac{2 \rho l_k}{(\omega A_m B_1)^2 \sum_{j=1}^N n_j A_{rj}} \left[\frac{(U_1 I_1)^2}{\varepsilon_1} + \dots + \frac{(U_i I_i)^2}{\varepsilon_i} + \dots + \frac{(U_N I_N)^2}{\varepsilon_N} \right]. \quad (6)$$

Fejezzük ki a rézvesztéséget az i -edik tekercs relatív helyfoglalása (ε_i) és relatív látszólagos teljesítménye (γ_i) függvényében. Ez közvetlenül nem tehető meg, csak olyan absztrakciók után, amelyek az előző, kéttekercses megoldáshoz vezetnek vissza:

- a továbbiakban az i -edik tekercset tekintjük a primer tekercsnek,
- a többi tekercs feszültségét azonosá tesszük:

$$U'_j = c_j U_j = U, \quad j=1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, N, \quad (7)$$

- a tekercsek áramát is transzformáljuk annak érdekében, hogy a látszólagos teljesítmények ($U_j I_j$) változatlanok maradjanak:

$$I'_j = I_j / c_j, \quad j=1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, N, \quad (8)$$

- kapcsoljuk a tekercseket párhuzamosan, és tekintjük őket egyetlen tekercsnek.

Ez esetben az (5) összefüggéssel analóg módon írható:

$$P_r = P_{\varepsilon_i} \left[\frac{1}{\varepsilon_i} + \frac{\left(\frac{1}{\gamma_i} - 1 \right)^2}{1 - \varepsilon_i} \right], \quad (9)$$

ahol:

$$\varepsilon_i = \frac{n_i A_{ri}}{\sum_{j=1}^N n_j A_{rj}}, \quad \gamma_i = \frac{U_i I_i}{\sum_{j=1}^N U_j I_j},$$

$$P_{\varepsilon_i} = \frac{2 \varrho l_k (U_i I_i)^2}{(\omega A_m B_1)^2 \sum_{j=1}^N n_j A_{rj}}. \quad (10)$$

Az ε_i és P_{ε_i} kifejezésekben hallgatólagosan feltételeztük, hogy az absztrahált tekercsek helyfoglalása azonos a valóságos tekercsek helyfoglalásával. Bizonyítandó tehát, hogy $n'_j A'_{rj} = n_j A_{rj}$.

Az absztrahált tekercs menetszáma (7) alapján $n'_j = c_j n_j$.

Az absztrahált tekercs huzalkeresztmetszete a

$$P'_{rj} = I_j'^2 \frac{\varrho n_j^2 l_j}{A'_{rj}} = P_{rj} \quad \text{összefüggésből}$$

$$A'_{rj} = \left(\frac{I'_j}{I_j} \right)^2 \left(\frac{n'_j}{n_j} \right) A_{rj} = \frac{A_{rj}}{c_j}.$$

Ezzel $n'_j A'_{rj} = c_j n_j \frac{A_{rj}}{c_j} = n_j A_{rj}$, amit bizonyítani akartunk.

A (9) összefüggésnek is – (5)-höz hasonlóan – $\varepsilon_i = \gamma_i$ esetén van minimuma, aminek értéke $P_{ri} = P_{\varepsilon_i} / \gamma_i^2$. Mivel a tárgyalás során i értékére semmiféle kikötést nem tettünk, a fenti megállapítás a transzformátor bármely tekercsére igaz.

Az $\varepsilon_i = \gamma_i$ feltételhez jutunk abban az esetben is, ha előírjuk, hogy a tekercselés egységnyi térfogatában keletkező rézvesztéségi teljesítmény legyen mindenütt azonos:

$$\frac{P_{ri}}{l_i n_i A_{ri}} = \frac{P_r}{\sum_{j=1}^N l_j n_j A_{rj}}. \quad (11)$$

Ez az egyenletes melegedés feltétele, amiből az i -edik tekercs rézvesztésége:

$$P_{ri} = P_r \frac{l_i n_i A_{ri}}{\sum_{j=1}^N l_j n_j A_{rj}}.$$

Az átlagos menethosszt mindenütt azonosnak véve ($l_i \approx l_j$):

$$P_{ri} = P_r \varepsilon_i. \quad (12)$$

Ugyanakkor a (6) összefüggéshez hasonlóan felírva az i -edik tekercs rézvesztéséget, az alábbi összefüggéshez jutunk:

$$P_{ri} = P_r \frac{\gamma_i^2}{\varepsilon_i}, \quad (13)$$

így a (12) és (13) egyenletek egyenlőségéből $\varepsilon_i = \gamma_i$.

Összefoglalva: a rézfelhasználás és a melegedés szempontjából egyaránt előnyös, ha a tekercsek relatív helyfoglalása (ε_i) azonos azok relatív látszólagos teljesítményével (γ_i). Ennek kielégítése érdekében a korábbi méretezési eljárást [2, 3] az alábbiakban pontosítjuk.

A RÉZVESZTÉSÉGEK FELOSZTÁSÁNAK PONTOSÍTÁSA

Az i -edik tekercs szabványos huzalátmérőjének ($d_i[q]$) meghatározása után kiszámítható a tényleges rézvesztésége:

$$P_{riü} = I_i^2 \frac{4 \varrho_i n_i l_i}{d_i^2 [q] \pi}. \quad (14)$$

Általában a tényleges és a felosztható rézvesztés nem egyezik egymással ($P_{riü} \neq P_{ri}$), mivel a szabványos huzalátmérő nem egyezik a számítottal ($d_i[q] \neq d_i$), és a tényleges menethossz eltér a közelítő átlagos menethossztól ($l_i \neq l_k$).

Vezessük be a rézvesztés-eltérés fogalmát:

$$\Delta P_{ri} = P_{ri} - P_{riü}. \quad (15)$$

A megengedett rézvesztés maradéktalan felosztását a továbbiakban úgy biztosítjuk, hogy a rézvesztés-eltérést felosztjuk a még nem realizált tekercsek között, ugyancsak az egyenletes melegedés arányában. A ténylegesen felosztható rézvesztés tehát:

$$P_{riü} = P_r \frac{U_i I_i}{\sum_{j=1}^N U_j I_j} + \Delta P_r \frac{U_i I_i}{\sum_{j=i}^N U_j I_j}, \quad (16)$$

ahol:

$$\Delta P_r = \sum_{j=1}^{i-1} \Delta P_{rj} = \sum_{j=1}^{i-1} (P_{rj} - P_{rjü}). \quad (17)$$

Az i -edik tekercs ugyanis a halmozott rézvesztés-eltérésből (ΔP_r) a realizálás előtt elvesz

$$\Delta P_{ri} = \Delta P_r \frac{U_i I_i}{\sum_{j=i}^N U_j I_j}$$

hányadot, a realizálás után pedig hozzátesz

$$\Delta P_{ri}^+ = P_{rit} - P_{riü} = (P_{ri} + \Delta P_{ri}^-) - P_{riü}$$

nagyságú többletet. Az i -edik tekercs eredő hozzájárulása a halmozott rézvesztés-eltéréshez tehát

$$\Delta P_{ri} = \Delta P_{ri}^+ - \Delta P_{ri}^- = P_{ri} - P_{riü}, \quad (18)$$

ahogy azt a (17) összefüggésben megadtuk.

A MENETHOSSZ PONTOSÍTÁSA

Az $\varepsilon_i = \gamma_i$ feltétel kihasználásával ugyancsak pontosítható a tekercs huzalátmérvényének számításához szükséges menethossz (l_i). Ezt a korábbiakban a tekercselés átlagos menethosszával közelítettük, amely a gyakorlatban akár 10%-kal is eltérhet a legkisebb (l_0) és a legnagyobb menethossztól.

Az i -edik tekercs közepes menethossza:

$$l_i = l_0 + \pi \left(2 \sum_{j=1}^{i-1} m_j + m_i \right). \quad (19)$$

A fenti összefüggésből a tekercs realizálásakor csupán a tekercs magassága (m_i) nem ismert, ez azonban az $\varepsilon_i = \gamma_i$ feltétel alapján közelíthető:

$$\varepsilon_i = \frac{n_i A_{ri}}{\sum_{j=1}^N n_j A_{rj}} = \frac{F_{ri} A_{ti}}{F_r A_t} = \frac{F_{ri} l_a m_i}{F_r l_a \sum_{k=1}^N m_k}, \quad (20)$$

ahol A_{ti} és A_t az i -edik tekercs, ill. az egész tekercselés keresztmetszete és l_a a csévetest ablakszélessége. Feltételezve, hogy a tekercs rézkitöltési tényezője (F_{ri}) megegyezik a tekercselés átlagos rézkitöltési tényezőjével (F_r), és hogy a tekercselés teljesen kitölti a csévetest ablakmagasságát (k_a), a tekercs közelítő magassága a (20) összefüggésből:

$$m_{ik} = k_a \gamma_i. \quad (21)$$

A közelítés a biztonság javára tér el a tényleges értéktől, mivel

$$k_a > \sum_{j=1}^N m_j,$$

tehát $m_{ik} > m_i$, azaz $l_{ik} > l_i$.

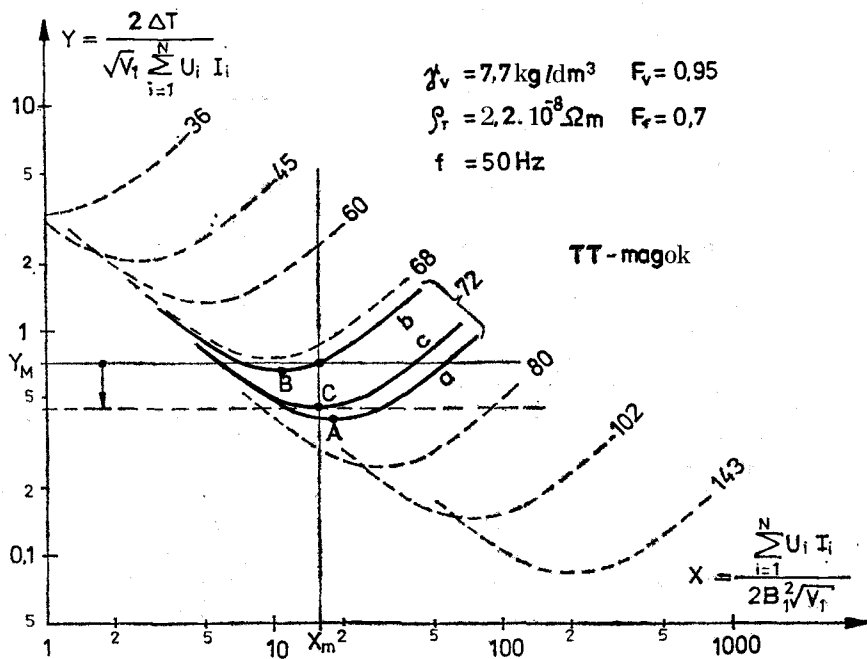
Végeredményben tehát az i -edik tekercs közepes menethossza:

$$l_{ik} \cong l_0 + \pi \left(\sum_{j=1}^{i-1} m_j + k_a \gamma_i \right). \quad (22)$$

MINIMÁLIS VESZTESÉGRE VALÓ OPTIMALIZÁLÁS

A transzformátor üzeme közben a veszteségi teljesítménnyel arányos energia hővé alakul. Ez elvben a magméret növelésével csökkenthető. Nyilvánvaló azonban, hogy ez nem lenne ésszerű eljárás, mert az ily módon megtakarított energia értéke nem lenne arányban azzal a költségnövekedéssel, amit a magméret növelése közvetlenül és közvetve (a berendezés méreteinek növekedésével) okozna. A veszteség minimalizálásán ezért a továbbiakban azt az eljárást értjük, amely a műszaki előírásokat kielégítő legkisebb magméreten a legkisebb veszteségi teljesítmény elérését célozza. Erre akkor van lehetőség, ha a tekercselés helyfoglalásának ellenőrzésekor kiderül, hogy a tekercselés nem tölti ki a rendelkezésre álló helyet. Ebben az esetben a huzalátmérvény növelésével fokozatosan csökkenteni tudjuk az energiavesztést.

A huzalátmérvény növekedését úgy idézzük elő, hogy a melegedés, ill. a hatásfok által korlátozott veszteségi teljesítményt kismértékben szigorítjuk, és a méretezést az üzemi indukció megválasztásától kezdve megismétljük egészen addig, amíg a tekercselés ki nem tölti a csévetest ablakát [3]. A folyamat jól szemlél-



1. ábra. A méretválasztási görbe eltolódása minimális veszteségre történő optimalizáláskor

tethető a méretezési eljárás [2] méretválasztási diagramján, amelyet példaképpen tekercselt toroid (TT) magokra adtunk meg az 1. ábrán. A fentiekben változt huzalátmérő-növelő algoritmus biztosítja, hogy az eredetileg optimális munkaponthoz tartozó indukció kövesse a rézkitöltési tényező növekedésének köszönhető munkapont-vándorlást (jobbra lefelé), sőt előfordulhat, hogy a tekercsjellemzők első kiszámítása alkalmával kapott rézkitöltési tényezővel még tilos területre eső munkapont (B) áttolódik a méretválasztási diagram megengedett térségébe (C). Ez utóbbi esetet szemlélteti az 1. ábra. Az ábra a görbéje az ideális rézkitöltési tényezővel számított görbe, amely alapján történik a magméret kiválasztása. A b görbe a minimális rézfelhasználásra való optimalizálással nyerhető görbe, amelyhez az előírást (Y_M) éppen teljesítő rézkitöltési tényező tartozik. Végül a c görbe a gyakorlatilag megvalósítható legnagyobb rézkitöltési tényezővel nyert görbe, amelyhez a veszteségre vonatkozó előírás fokozatos szigorításával (Y_M csökkentésével) jutunk.

TECHNOLÓGIAI OPTIMALIZÁLÁS

A tekercselés technológiai szempontok szerinti optimalizálásának különösen a tömeggyártásban van jelentősége. A gyártástechnológia lehetőségeit elsősorban a tekercsek száma, huzalátmérője és tekercselési sorrendje, továbbá a tekercssorok és a tekercsek közötti szigetelésre vonatkozó előírások szabják meg.

Erosen eltérő huzalátmérőjű tekercsek esetén nem célszerű a tekercselést elkezdni sem túl vékony ($d < 0,1$ mm), sem túl vastag ($d > 1$ mm) huzallal [5]. Az állandó szögsebességű gépi tekercselés ui. a szögletes csévetest miatt nem egyenletes kerületi sebességre készíti a lecsévelő orsót. Emiatt a túl vékony huzalok a csévetest kezdetben még viszonylag éles sarkain könnyen elszakadhatnak. A túl vastag huzal pedig nem hajlékony, még nagy feszítő erő esetén sem fekszik fel a csévetestre, így a kezdősor alatt kihasználatlanul maradó üres hely miatt csökken a tekercselési keresztmetszet.

Amennyiben tehát a tekercsek sorrendjét egyéb (pl. biztonsági) előírás nem szabja meg, úgy célszerű 0,1–1 mm átmérőjű huzallal kezdeni a tekercselést. A primer tekercs huzalátmérője a gyakorlatban e tartományba esik, így a technológiailag kedvező szempont igen gyakran egyeztethető a primer tekercs elválasztására vonatkozó szigorúbb biztonságtechnikai előírásokkal.

Sok tekercsből álló tekercselésnél nem közömbös, hogy az egyes tekercsek utolsó sora hogyan fejeződik be. Különösen igaz ez a vastag huzalú tekercsekre. Ha ugyanis a tekercs utolsó sora nincs teljesen teletekercselve, ez a további tekercsek elkészítését nehezíti, mert a keletkező „lépcső” lehetetlenné teszi a következő tekercs meneteinek egymás mellé tekercselését. A gyakorlatban ezt úgy kerüljük el, hogy az utolsó sor üresen maradó részét szigetelő anyaggal tekercselik tele. Ez azonban nem a legjobb megoldás, egyrészt járulékos anyagot és műveletet igényel, másrészt rontja a tekercselés rézkitöltési tényezőjét.

A továbbiakban azt vizsgáljuk meg, hogyan alakíthatók ki a huzalátmérő változtatásával olyan te-

kercek, amelyek utolsó sora is teljesen, vagy csaknem teljesen tele van tekercselve.

HUZALÁTMÉRŐ NÖVELESE (SORKIEGÉSZÍTÉS)

Legyen az i -edik tekercs realizálásakor kapott szabványos huzal csupasz és szigetelt átmérője $d_i[q]$ és $D_i[q]$, és tételezzük fel, hogy a tekercs utolsó sora nincs teljesen kitöltve. Válasszunk eggyel nagyobb szabványos átmérőjű huzalt ($d_i[q+1]$, $D_i[q+1]$), és vizsgáljuk meg, hogy a sorok száma nem növekedett-e. Növeljük így módon a huzalátmérőt mindaddig, amíg a sorok száma nem változik. Legyen az így kapott huzalátmérő $d_i[q+u]$, ill. $D_i[q+u]$.

Az azonos sorban való maradás feltétele:

$$\frac{n_i D_i[q+u]}{l_a} < s_i, \quad (23)$$

ahol s_i a tekercs sorainak a száma.

Vizsgáljuk meg, hogyan változik eközben a tekercs rézkitöltési tényezője. Az eredeti huzallal:

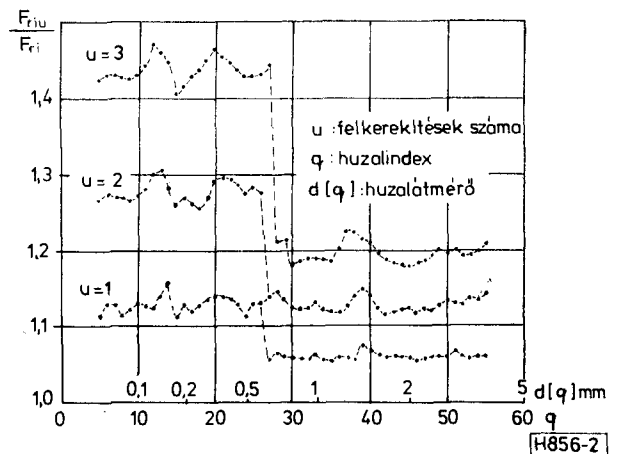
$$F_{ri} = \frac{n_i d_i^2[q] \pi}{4 s_i D_i[q] l_a}. \quad (24)$$

A megnövelt átmérőjű huzallal:

$$F_{riu} = \frac{n_i d_i^2[q+u] \pi}{4 s_i D_i[q+u] l_a}. \quad (25)$$

A rézkitöltési tényezők aránya:

$$\frac{F_{riu}}{F_{ri}} = \left(\frac{d_i[q+u]}{d_i[q]} \right)^2 \frac{D_i[q]}{D_i[q+u]}. \quad (26)$$



2. ábra. A rézkitöltési tényező relatív értéke sorkiegészítés esetén

A (26) összefüggés értékei szabványos Mzz huzalokra [6] a 2. ábráról olvashatók le. Látható, hogy a rézkitöltés növekedésének aránya függ a huzalátmérő-felkeresítés számától (u) és a huzalátmérőtől. $u=1$ esetén a sorkiegészítés a vékony ($d < 0,7$ mm) huzaloknál átlagosan 13%-kal növeli a rézkitöltési tényezőt, de a vastagabb ($d > 0,7$ mm) huzaloknál is több mint 5% a javulás. $u > 1$ esetén a javulás még nagyobb mértékű, természetesen annak a valószínűsége,

hogy a megnövelt átmérőjű huzallal a sorok száma változatlan marad a felkerekítések növekvő számával egyre kisebb.

HUZALÁTMÉRŐ CSÖKKENTÉSE (SORELHAGYÁS)

Tételezzük fel ismét, hogy az eredeti $d_{i[q]}$, $D_i[q]$ átmérőjű huzallal az i -edik tekercs utolsó sora nincs teljesen kitöltve. Válasszunk most egyre kisebb szabványos átmérőjű huzalt mindaddig, amíg a tekercs utolsó sorából a menetek eltűnnek. Legyen az így kapott csupasz és szigetelt huzalátmérő $d_{i[q-v]}$, ill. $D_i[q-v]$. A sorelhagyas feltétele:

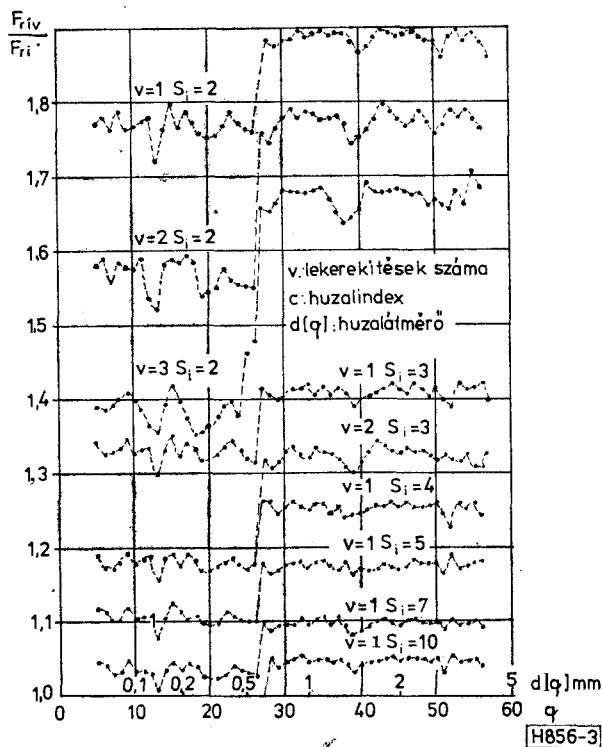
$$\frac{n_i D_i[q-v]}{l_a} < s_i - 1. \quad (27)$$

A (24) és (25) összefüggésekhez hasonlóan felírva a sorelhagyas utáni és előtti rézkitöltési tényezőt, és ezek hányadosát képezve:

$$\frac{F_{ri v}}{F_{ri}} = \left(\frac{d_{i[q-v]}}{d_{i[q]}} \right)^2 \frac{D_i[q]}{D_i[q-v]} \frac{s_i}{s_i - 1}. \quad (28)$$

A (28) összefüggés értékei szabványos Mzz huzalokra [6] a 3. ábrán olvashatók le. A sorelhagyas hatása láthatóan nemcsak a lekerekítések számától (v) és a huzalátmérőtől, hanem a sorok számától (s_i) is függ. Kevés sorból álló ($s_i < 5$), vastag huzalú ($d > 0,7$ mm) tekercsnél a rézkitöltési tényező növekedése a sorkiegészítéssel elérhető javuláshoz képest (1. 2. ábra) lényegesen nagyobb arányú.

A sorkiegészítés és a sorelhagyas tehát nemcsak azzal az előnnyel jár, hogy megkönnyíti a további te-



3. ábra. A rézkitöltési tényező relatív értéke sorelhagyas esetén

keresek tekercselését, hanem egyúttal a rézkitöltési tényezőt is növeli, és ezzel lehetővé teszi, hogy a technológiai optimalizálás ne rontsa az előző optimalizálások eredményeit annak ellenére, hogy eközben el-
térünk a rézvesztés optimális elosztásától.

AZ OPTIMALIZÁLÁSOK KAPCSOLATA

Vizsgáljuk meg, hogy mekkora lehet a fent említett eltérés. Tételezzük fel, hogy a technológiai optimalizálást megelőzően kielégítettük az egyenletes melegedés feltételét, azaz $\varepsilon_i = \gamma_i$ és $P_{ri} = P_{rm} = P_{\varepsilon_i} / \gamma_i^2$.

A technológiai optimalizálás után a rézvesztés:

$$P_{ri} = P_{\varepsilon_i} \left[\frac{1}{\varepsilon_{it}} + \frac{\left(\frac{1}{\gamma_i} - 1 \right)^2}{1 - \varepsilon_{it}} \right], \quad (29)$$

ahol:

$$P_{\varepsilon_i} = \frac{2 \rho l_k (U_i I_i)^2}{(\omega A_m B_1)^2 F_{ri} A_{it}}, \quad \varepsilon_{it} = \frac{n_i A_{rit}}{\left(\sum_{j=1}^N n_j A_{rj} \right)_t},$$

$$F_{ri} = \frac{\left(\sum_{j=1}^N n_j A_{rj} \right)_t}{A_{it}}. \quad (30)$$

Az i -edik tekercs helyfoglalásának hasznára vagy rovására a többi tekercs helyfoglalása is változhat. Tegyük fel, hogy a tekercselési összkereztmetszet változatlan marad ($A_{it} = A_i$).

Képezzük a technológiai optimalizálás utáni és előtti rézvesztés hányadosát:

$$\frac{P_{ri}}{P_{rm}} = \frac{F_r}{F_{ri}} \gamma_i^2 \left[\frac{1}{\varepsilon_{it}} + \frac{\left(\frac{1}{\gamma_i} - 1 \right)^2}{1 - \varepsilon_{it}} \right]. \quad (31)$$

A 2. és 3. ábrák szerint a tekercsek rézkitöltési tényezője az optimalizálás hatására javul. Ezzel az eredő rézkitöltési tényező is nő, azaz $F_{ri} / F_r > 1$. A kétféle rézkitöltési tényező-arány közötti közvetlen kapcsolatot azonban nem tudjuk megadni, mivel az optimalizálás során a többi tekercs paramétere is változhat.

Közelítő becslés céljából tegyük fel, hogy

$$\left(\sum_{j=1}^N n_j A_{rj} \right)_t = \sum_{j=1}^N n_j A_{rj} + F_r \Delta A_{it}, \quad (32)$$

ahol ΔA_{it} a sorkiegészítés, ill. a sorelhagyas folyamán az i -edik tekercs utolsó sorában hasznosított, ill. szabadra tett tekercselési keresztmetszet. Ez esetben

$$\frac{F_{ri}}{F_r} = \frac{\left(\sum_{j=1}^N n_j A_{rj} + F_r \Delta A_{it} \right) / A_{it}}{\sum_{j=1}^N n_j A_{rj} / A_{it}} = 1 + \frac{\Delta A_{it}}{A_{it}}. \quad (33)$$

Ezzel a (31) összefüggés:

$$\frac{P_{ri}}{P_{rm}} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta A_{it}}{A_{it}}} \left[\frac{\gamma_i^2}{\varepsilon_{it}} + \frac{(1 - \gamma_i)^2}{1 - \varepsilon_{it}} \right]. \quad (34)$$

A technológiai optimalizálás akkor nem rontja az

előző optimalizálások eredményeit, ha $P_{rt}/P_{rm} < 1$. E feltétellel a (34) összefüggésből kifejezhető a relatív helyfoglalás (ε_{it}) relatív látszólagos teljesítményre (γ_i) vonatkoztatott megengedett alsó és felső eltérése:

$$\left(\frac{\varepsilon_{it}}{\gamma_i}\right)_{\max}^{\min} = \frac{1+A_2}{1+A_1} \sqrt{\left(\frac{1+A_2}{1+A_1}\right)^2 - \frac{1}{1+A_1}}, \quad (35)$$

ahol $A_1 = \Delta A_{it}/A_i$ és $A_2 = \Delta A_{it}/2A_i\gamma_i$.

A (35) összefüggés által megadott korlátokon belül maradván az eredő rézvesztési teljesítmény a technológiai optimalizálás következtében nem növekszik annak ellenére, hogy közben eltérünk a rézvesztés (12) szerinti elosztásától.

MINTAPÉLDÁK

Az optimalizálásokkal kibővített program működésének bemutatására két-két futtatási példa eredmé-

nyeit hasonlítjuk össze. A két példa specifikációit az 1. táblázatban adtuk meg. A futtatások fontosabb eredményeit a 2. táblázatban foglaltuk össze. Az 1. példa eredményeivel a technológiai optimalizálás, a 2. példával a minimális veszteségre való optimalizálás hatását kívánjuk bemutatni.

A minimális rézfelhasználásra való optimalizálással, majd az azt követő technológiai optimalizálással kapott eredményeket összehasonlítva (2. tábl., 1. példa) látható, hogy a tekerceslés célszerűbb elrendezésével a tekerceslési helytartalék több mint 50%-kal nőtt, miközben a rézmennyiség nem egészen 4%-kal több, ennek köszönhetően viszont valamivel csökkent a rézvesztés és a melegedés.

A minimális rézfelhasználásra való optimalizálással adódó bőséges tekerceslési helytartalékot (48%) minimális veszteségre való optimalizáláshoz felhasználva (2. tábl., 2. példa) látható, hogy a rézvesztés mintegy 5 W-tal csökkent, ugyanakkor elegendő tekerceslési helytartalék is maradt.

A mintapéldák specifikációs adatai

1. táblázat

Specifikáció		1. példa			2. példa		
Szekunder tekeresszám		4			1		
Szekunder tekeresadatok		U_t [V]	I_t [A]	terhelés	U_t [V]	I_t [A]	terhelés
Sorszám (i):	1.	24	1,5	ohmos	220	0,2	ohmos
	2.	9	1,0	kétutas ei.	—	—	—
	3.	10	2	Graetz ei.	—	—	—
	4.	100	0,01	egyutas ei.	—	—	—
Üzemi hőmérséklet, [°C]		90			90		
Környezeti hőmérséklet, [°C]		35			35		
Maximális indukció, [T]		1,7			1,8		
Vasvesztési szám, V_1 , [W/kg]		0,6			0,6		
Alkalmazható magtípus		TM			TT		

A mintapéldák eredményei

2. táblázat

Eredmények	1. példa		2. példa	
Optimalizálás	Minimális rézfelhasználás	Minimális rézfelhasználás + technol. opt.	Minimális rézfelhasználás	Minimális veszteségre való opt.
Magméret	74/32	74/32	72	72
Melegedés, [°C]	54,7	53,8	48,9	23,7
Rézvesztés, [W]	7,2	7,1	8,4	3,3
Réztömeg, [g]	278	288	57	129
Tekerceslési helytartalék, [%]	11	17	48	14

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetet mondok dr. Granát Jánosnak, aki a minimális rézfelhasználás kritériumának megállapítását inspirálta, valamint dr. Takács Ferencnek és dr. Barát Zoltánnak a kézirat gondos átnézéséért és hasznos észrevételeikért.

I R O D A L O M

[1] *Pfliegel P.*: Híradástechnikai hálózati transzformátorok anyag-, energia- és technológiai optimum-

ra való méretezése. Egyetemi doktori értekezés, BME—HEI, 1982.

[2] *Granát J.—Takács F.*: Vas- és ferritmagos transzformátorok tervezése. Híradástechnika, XXII. évf., 7., sz. 201—205. o.

[3] *Granát J.—Pfliegel P.*: Hálózati transzformátorok méretezése EMG—666 asztali kalkulátoron. Híradástechnika, XXX. évf., 5. sz., 135—141. o.

[4] *Pfliegel P.*: Híradástechnikai hálózati transzformátorok melegedésvizsgálata. Híradástechnika, XXXIV. évf., 6. sz., 247—254. o.

[5] *Takács F.*: Híradástechnikai alkatrészek. Tankönyvkiadó, Budapest, 1981.

[6] MSZ 15 800/3—74 Zománchuzal. Felület. Méretek.
