

Usmerniški transformatorji za Slovenske železnice

Juso Ikanović

Kolektor Etra d.o.o., Šlandrova 10, SI- 1231 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: Juso.Ikanovic@kolektor.com

Povzetek. V članku je podan pregled nekaterih pomembnejših tehničnih karakteristik usmerniških transformatorjev, ki smo jih izdelali v projektu modernizacije Slovenskih železnic. Opisane so glavne posebnosti v zahtevah tovrstnih pogonov in značilnosti navitij z različnim številom medsebojnih prepletov. V omenjenih projektih je prvič izveden aksialni križni prehod vodnikov med dvema navitjema, nujna tehnološka novost, s katero smo izpolnili zelo stroge kriterije glede magnetne povezave med nizkonapetostnima navitjema. Navitje, izdelano na tak način, smo poimenovali križno navitje. Izvedli smo eno, dve in tri križanja med navitji in dosegli faktor sklopa usmerniških transformatorjev 0,92 in 0,967. Na koncu smo dosežene rezultate ovrednotili s primerjavami z zahtevami SIST EN standarda na tem področju.

Ključne besede: usmerniški transformator, projektant, faktor sklopa, križno navitje

Converter Transformers manufactured to the Slovenian Railways

The paper contains an overview of the most significant technical characteristics of converter transformers manufactured to modernize of Slovenian Railways. The main features and characteristics of this type of the traction drives with various intersected winding configurations are described. The referenced projects include the first application of axial winding crossing, i.e. a technological innovation resolving the strong magnetic coupling requirement of low-voltage windings. The solution is referred to as an intersected winding. With one, two and three winding crossings coupling factors of 0.920 and 0.967 are achieved. The results meet the specifications, of the SIST EN standard.

1 UVOD

Pri izračunih in načrtovanju projektov se projektanti vselej želimo približati tako imenovani "optimalni" konstrukciji. Običajno se pot k načrtovani optimalni rešitvi začne z različnimi numeričnimi izračuni, ki določajo transformator glede na stroške vgrajenih strateških materialov.

Pri projektiranju specialnih transformatorjev je pot h končni rešitvi podobna, vendar obstaja tudi vzporedna praktična optimalna rešitev, ki je odvisna od tehnoloških in izvedbenih omejitev. Pri tovrstnih projektih se pogosto ukvarjamo s pojmom izvedljivosti projekta in ne z optimizacijo v njenem klasičnem pomenu.

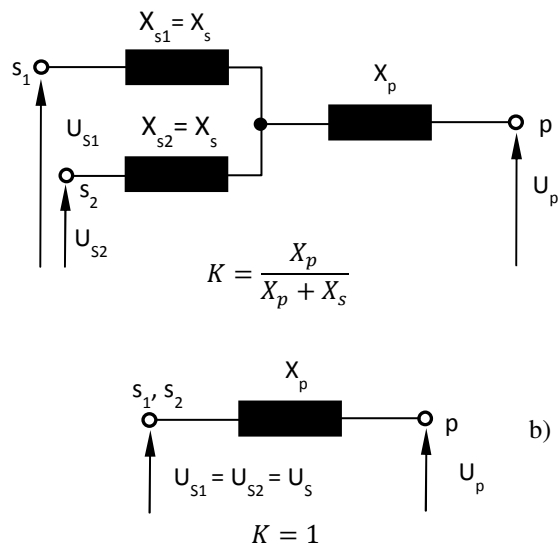
Razvoj usmerniških transformatorjev se je v tovarni začel leta 1993, ko je bil izdelan prvi transformator za enosmerno napajalno postajo (ENP) Sava. Iz preglednice v tabeli 1 je razvidno, da ta transformator napaja mostni tip usmernika v vzporedni vezavi s sesalno dušilko, vezava št. 9 [4] [5]. Pozneje izdelani

transformatorji iz let 1997 in 2011 so bili narejeni za serijsko mostno vezavo usmernikov, in sicer za vezavo št. 12. Transformatorji so nameščeni v treh različnih energetske postajah.

Tehnične zahteve so bile za vse projekte enake.

2 GLAVNE ZAHTEVE IN OMEJITVE

Usmerniški transformatorji za električno enosmerno vleko, obravnavani v tem članku, spadajo v skupino specialnih transformatorjev z vrsto posebnosti in zahtev. V obravnavi se bomo omejili na zahteve, ki določajo faktor sklopa, kratkostične napetosti in dovoljene tolerančne omejitve.



Slika 1: Nadomestno vezje usmerniškega transformatorja

Tabela 1: Pregled usmerniških transformatorjev

Objekt		ENP SAVA	ENP ČRNOTIČE	ENP DEKANI
Tip transformatorja		UNT 3650	UNT 5460	URT 7272
Postavitev		Zunanja		
Izolacijsko sredstvo		Mineralno olje		
Število faz		3		
Nazivna frekvenca	Hz	50		
Način hlajenja		ONAN		
Najvišja temperatura okolice	°C	40		
Nazivna moč	kVA	3650/2 x 1890	5460/2 x 2830	7272/2 x 3770/50
Preobremenitve		razred VI		
Nazivna napetost v prostem teku	kV	35(20,2)/2 x 2,67	20/2 x 1,335	114/2 x 1,332/0,4
Najvišje obratovalne napetosti	kV	36/7,2	24/7,2	123/7,2
Stopnja izolacije LI (1,2/50) / AC (1'):				
VN navitje	kV	170/70	125/50	550/230
NN navitje	kV	40/20		
Vežalna skupina		Yy0d11(Dy1d0)	Dy11d0	Yy0d11+syn0*
Regulacija napetosti		brez obremenitve ± 4 x 2,5 %	brez obremenitve + 1/ - 3 x 2,5 %	pod obremenitvijo ± 8 x 1,25 %
Najvišji segretki: olja/navitij	K	60/65		
Kratkostična napetost VN/NN	%	8,3	8,9	10,8
Mase: Olja/Skupna	t	2,3 / 12	2,9 / 14,5	10,5 / 31
* Vgrajeno navitje za napajanje lastne rabe 50 kVA- 400 V				

2.1 Faktor sklopa

Razmerje nadomestnih razsipanih reaktanc ali faktor sklopa po zahtevah iz standarda [4] mora biti $K > 0,9$. Faktor sklopa določamo iz nadomestnega vezja za običajen trinaviti transformator po sliki 1;

$$K = \frac{X_p}{X_p + X_s}, \quad (1)$$

kjer je:

$$X_p = \frac{X_{ps1} + X_{ps2} - X_{s1s2}}{2}$$

$$X_{s1} = \frac{X_{ps1} - X_{ps2} + X_{s1s2}}{2} \cong X_s \quad (2)$$

$$X_{s2} = \frac{X_{ps2} - X_{ps1} + X_{s1s2}}{2} \cong X_s$$

Nadomestne reaktance so fiktivne računске vrednosti brez pravega fizikalnega pomena, a so kljub temu dobra podlaga pri analizah različnih stanj v električnih omrežjih. Enako velja za izračun faktorja sklopa, ki ga v usmerniški tehniki določajo prav iz razmerja nadomestnih razsipanih reaktanc. Analize usmerniških pogonov so pokazale, da ima razmerje K pomemben vpliv na različna obratovalna stanja transformatorja [4]. Izmed pomembnejših je zunanja karakteristika usmerniškega transformatorja. Značilno obratovalno stanje nastopi, ko je eno nizkonapetostno navitje v prostem teku, drugo pa polno obremenjeno. Višje je razmerje K , manjše so razlike med napetostmi na sekundarni strani. Nadomestno vezje usmerniškega transformatorja je zaradi obratovalnih zahtev usmerniških pogonov specifično.

Zaradi dobre geometrične simetrije križnega navitja je razlika med razsipanima reaktancama X_{ps1} in X_{ps2} glede na njihovo srednjo aritmetično vrednost zanemarljivo majhna, znaša le 0,2 %, kar omogoča, da se nadomestna reaktanca sekundarnega navitja X_s izračuna preprosto;

$$X_{s1} = X_{s2} = X_s = \frac{X_{s1s2}}{2} \quad (3)$$

$$(X_{ps1} = X_{ps2}).$$

Faktor magnetnega sklopa, kot ga poznamo iz splošne teorije o transformatorjih [2], določa razmerje med medsebojno induktivnostjo M in lastnimi induktivnostmi posameznih navitij L_{s1} in L_{s2} .

Izhaja iz enačbe

$$k = \frac{M^2}{L_{s1} \cdot L_{s2}}, \quad (4)$$

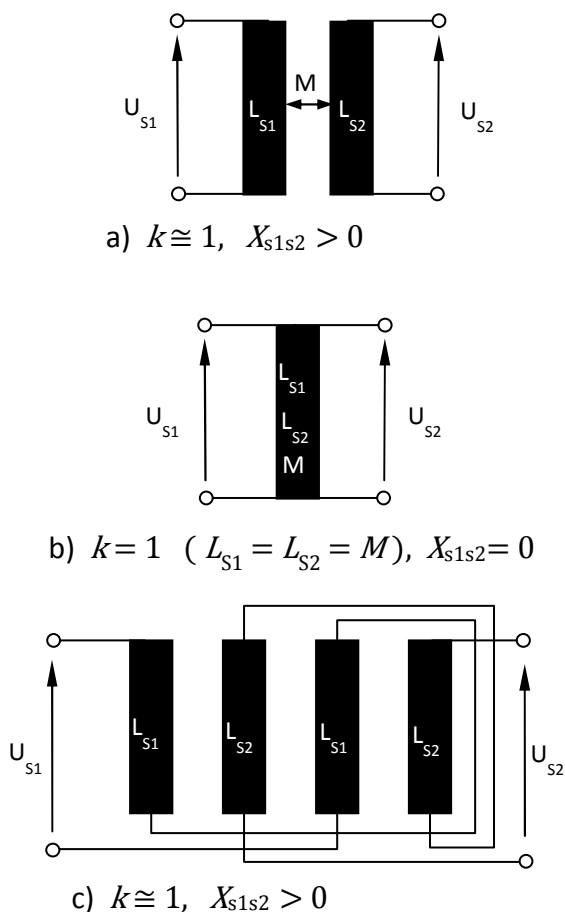
ki velja za dvonaviti transformator. Faktor magnetnega sklopa se pri energetskih transformatorjih približuje vrednosti 1 z veliko natančnostjo, za konstrukcijo na sliki 3d izračunamo $k = 0,999997$ in za konstrukcijo na sliki 3a $k = 0,999956$. Šele iz izračuna večmestnega decimalnega števila zaznamo razliko v magnetnem sklopu dveh zelo različnih konstrukcij. Ne glede na prostorsko razporeditev dveh navitij je vedno izpolnjen pogoj $k < 1$.

Faktor sklopa usmerniškega transformatorja (K) je odvisen od popolnosti magnetnega sklopa nizkonapetostnih navitij (k). Obe količini združuje in enači le teoretično dosegljivo stanje popolnosti sklopov

$k = K = 1$, sicer je pri naravnih konstrukcijah vedno izpolnjena neenakost $k > K$.

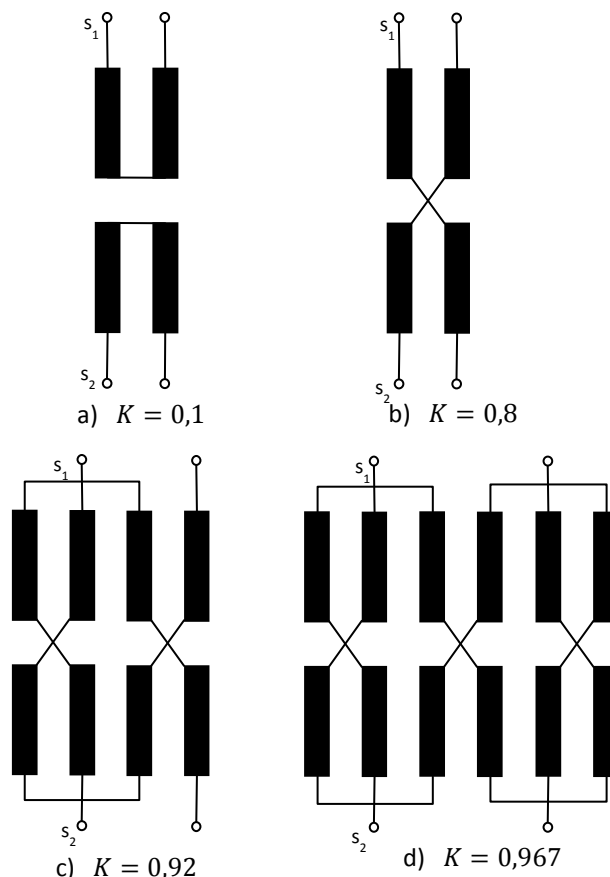
Boljšo predstavo o popolnosti sklopa med navitjema s_1 in s_2 podaja njuna reaktanca razsipanja v odstotkih, ki je v projektantski praksi znana in preprosto določljiva. Pri naravnih konstrukcijah je vedno $X_{s_1s_2} > 0$.

Nično razsipanje med dvema navitjema dosežemo le teoretično in sicer tako, da obe navitji približamo skupaj vse do stanja njune superpozicije, ko obe navitji hkrati zasedeta isti prostor (slika 2b). V praksi so temu stanju mogoči le naravni približki, in sicer takšni, da obe navitji razdelimo na večje število sekcij ter ustvarimo možnosti za čim pogostejšo izmenjavo zasedenih prostorov. Vrednost razsipanja med nizkonapetostnima navitjema, ki smo ga dosegli z uvedbo šestih delitev in treh križanj po sliki 3d, je znašala $X_{s_1s_2} = 0,7\%$.



Slika 2: Faktor magnetnega sklopa nizkonapetostnih navitij

Pri tako nizkih vrednostih razsipanja je že vpliv vezi in povezav med navitji in sekcijami lahko škodljiv. V ta namen smo že pri navijanju navitij na navijalnem stroju izvedli večkratno obračanje navitij. Postopek obračanja se izvede po vsakem križnem prehodu, s čimer smo dosegli najkrajše povezave med posameznimi sekcijami in posledično zmanjšali vpliv vezi na skupno razsipanje. Križni prehod med sekcijama je neprekinjen.



Slika 3: Križno navitje z enim (b), dvema (c) in tremi križanji (d)

Nizkonapetostne povezave med sekcijami imajo o precejšen presek in so dimenzionirane za tok enega kilo ampera in več. Krajše povezave med sekcijami so pripomogle k zmanjšanju dodatnih izgub v navitjih in kratkostičnih izgub v transformatorju.

Nadomestna reaktanca primarnega in sekundarnega navitja je enaka

$$X_p = 10,35\%, X_s = 0,35\%$$

Ker je $X_p \gg X_s$, nadomestno vezje trinavitega transformatorja preide v običajno dvonavitno vezavo z eno samo nadomestno reaktanco X_p in sekundarno napetostjo $U_{s1} = U_{s2} = U_s$ (slika 1b).

Z vidika obratovanja usmernika dober sklop transformatorja pripomore k boljši stabilnosti pogona, saj razlike v obremenitvah usmerniških vej od prostega teka do polne obremenitve ne povzročajo bistvenih razlik med napetostmi na usmerniški strani. Za dinamične pogone s pogostimi preobremenitvami je to pomembna lastnost usmerniškega transformatorja.

Vrednost sklopa, ki smo ga dosegli z uvedbo križnega navitja s šestimi delitvami in tremi križanji po sliki 3d, je znašala $K = 0,967$ s čimer smo se približali teoretični popolnosti sklopa $K = 1$.

2.2 Odstopanja

Dovoljeno odstopanje kratkostične napetosti med pari navitij s_{1-p} in s_{2-p} glede na njihovo aritmetično srednjo vrednost ne sme preseči tolerančnih meja $\pm 1,5\%$. Za primerjavo, dovoljena odstopanja kratkostičnih napetosti za energetske transformatorje znašajo od $\pm 7,5\%$ do $\pm 10\%$. Iz te zahteve lahko sklepamo, da se pri usmerniških enotah pričakuje zelo stroga simetrija obeh vzporednih vej, kar je povezano s stabilnostjo v obratovanju usmernika in transformatorja. Izračuni in končne meritve so pokazali odstopanja kratkostičnih napetosti po posameznih vejah v razponu $\pm 0,2\%$ kar je vrednost, ki se približuje meji merilne zanesljivosti opreme. Konstrukcija nizkonapetostnih navitij v križni izvedbi zagotavlja skoraj popolno geometrično simetrijo obeh nizkonapetostnih vej do napajalnega navitja.

2.3 Kratkostična napetost

Kratkostična napetost med nizkonapetostnima navitjema s_1 in s_2 ne sme preseči vrednosti 2% . Zahteva se sicer zdi precej preprosta, vendar če upoštevamo, da je lahko že ohmska komponenta kratkostične napetosti 1% in več, ostane za induktivno komponento na voljo le še $1,7\%$. Pri transformatorjih z velikimi izgubami se razmere še dodatno poslabšajo. Da bi dosegli zahteve, je bilo treba razviti nov način navijanja navitij z nizko stopnjo razsipanja. Hkrati je bilo treba doseči geometrično simetrijo obeh nizkonapetostnih navitij do visokega navitja. S preprosto vezavo, prikazano na sliki 2c, zahtevanih pogojev ni mogoče izpolniti. Izvedba 3a je tukaj podana kot simbolna izvedba, tehnološko najpreprostejša, a z najslabšim sklopom reda 0,1. Če upoštevamo, da sta nizkonapetostni navitji različnih vezav, mora biti eno vezano v zvezdo, drugo v trikot, je njihov medsebojni preplet zelo težaven, včasih celo neizvedljiv. Različno število ovojev v nizkonapetostnih navitjih ter delitev le- teh na štiri ali celo šest sekcij pri nizkem številu ovojev pomeni resno izvedbeno omejitev zlasti pri transformatorjih z večjo močjo, kjer se število ovojev s povečanjem moči zmanjšuje. Dodatne težave povzroča še notranja izolacija, ker je bilo treba vse sekcije med seboj izolirati za polno preizkusno napetost.

Kratkostična napetost v vezavi na sliki 3d je znašala $u_{ks1s2} = 1,2\%$.

Tabela 2: Primerjava merjenih rezultatov z zahtevami

Zahteva [4]	Merjeno
$K > 0,9$	$K = 0,967$
$\Delta u_{kps} = \pm 1,5\%$	$\Delta u_{kps} = \pm 0,2\%$
$u_{ks1s2} = 2\%$	$u_{ks1s2} = 1,2\%$

V tabeli 2 so podani rezultati izračunov pomembnejših parametrov. Doseženi rezultati so primerjani z zahtevami SIST EN [4]. Vsi tukaj uporabljeni in

izračunani podatki so povzeti iz rezultatov zaključnih meritev projekta ENP Dekani.

3 SKLEP

Faktor sklopa usmerniškega transformatorja je razmerje nadomestnih razsipanih reaktanc, ki ga v usmerniški tehniki določamo po enačbi (1). Faktor sklopa je odvisen od popolnosti magnetnega sklopa sekundarnih navitij iz enačbe (4). Določajo ga konstrukcijske in prostorske razporeditve navitij. Razmerje je pomembna lastnost usmerniškega transformatorja, ki vpliva na stabilno obratovanje usmernika. Določa zunanjo karakteristiko usmernika in delno duši kratkostične toke v sistemu, kar je za usmerniške pogone s pogostimi kratkimi stiki in preobremenitvami pomemben dejavnik [3]. Izboljšan faktor sklopa z zahtevanih 0,9 na 0,967 presega zahteve, določene s standardom SIST EN. Izboljšava zagotavlja transformatorjem stabilnejšo zunanjo karakteristiko usmernika in zmanjšanje kratkostičnih tokov v navitjih in usmerniku.

Pri modernizaciji Slovenskih železnic smo izdelali usmerniške transformatorje, ki ustrezajo zahtevam za napajanje usmernikov v dveh različnih vezavah usmernikov 9 in 12. Za doseg zahtevanih karakteristik smo razvili tehnologijo navijanja nizkonapetostnih navitij po postopku večkratnega medsebojnega prepleta z minimalnim številom medsebojnih povezav. Zaradi značilnega notranjega prehoda med sekcijami smo navitje poimenovali križno navitje.

Upravičenost v izdelavi tovrstnih navitij lahko najdemo tudi v navadnih energetskih transformatorjih.

LITERATURA

- [1] M. Vidmar, Die Transformatoren, Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart, 1956.
- [2] A. Dolenc, Transformatorji, Fakulteta za elektrotehniko v Ljubljani, Ljubljana 1969.
- [3] SIST EN 50327, 2003: Railway applications- Fixed installations- Harmonisation of the rated values for converter groups and tests on converter groups.
- [4] SIST EN 50329, 2003: Railway applications- Fixed installations- Traction transformers.
- [5] IEC 146- 1- 3, 1991: Semiconductor converters.

Juso Ikanović je diplomiral leta 1976 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Magisterij je dokončal leta 1986 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Zagrebu. Od prve zaposlitve v letu 1977 (Energoinvest TTL), se ukvarja z izračunom in konstrukcijo specialnih energetskih transformatorjev. Delo nadaljuje v sedanjem podjetju Kolektor ETRA 33 d.o.o. S tega področja ima objavljenih nekaj strokovnih člankov v Elektrotehniškem vestniku in v nacionalnih komitejih, nekdanjem Juko CIGRE in Sloko CIGRE.