

Optimiziranje izkoristka pri prenosu električne energije z dvosistemskim daljnovodom

Thales M. Papazoglou

*Electric Power Systems Lab (EPSL), Electrical Engineering Department,
The Technological Educational Institute of Crete
E-pošta: thales@teemail.gr*

Povzetek. Dandanes postaja izboljšanje učinkovitosti obratovanja elektroenergetskega sistema čedalje pomembnejša tema. Tem bolj zato, ker se k stroškom izgub dodatno prišteva še strošek, povezan z izpusti CO₂. Splošno znano je, da se nezanemarljiv delež proizvedene električne energije porabi v obliki izgub na daljnovodih. V tem članku so predstavljene ključne točke teorije največje prenosne zmogljivosti daljnovodov. Izpeljane so na podlagi valovnih enačb za nadzemni vod.

Na primeru je predstavljeno, kako optimizirati učinkovitost prenosa po dvosistemskem daljnovodu v času manjših obremenitev. Na konkretnem primeru določimo prag moči, pri katerem pride do zamenjave najučinkovitejšega obratovanja daljnovoda med prenosom električne energije po eno- oz. dvosistemski povezavi. Izračun omenjenega praga moči smo razširili tudi na večsistemske daljnovode.

V študiji tudi analiziramo učinkovitost prenosa delovne moči v odvisnosti od obremenitve daljnovodov in spremembo karakterja od kapacitivnega k induktivnemu s povečevanjem obremenitve daljnovodov za dva različna faktorja moči ($\cos \Phi = 0,85$ in $0,95$ induktivno). Zmanjšanje izgub zaradi učinkovitejšega prenosa je izračunano v odstotnih točkah učinkovitosti prenosa. V sklepnem delu je predstavljena praktična uporabnost te optimizacije tako za konstrukcijo daljnovodov, kakor tudi za optimizacijo obratovanja elektroenergetskega omrežja v času, ko je njegova obremenitev na minimalni vrednosti.

Ključne besede: optimizacija izkoristka prenosa, dvosistemski daljnovod, krivulje spremembe karakterja daljnovoda

Preparation of Papers for Elektrotehniški vestnik

Nowadays the question of improving overhead-line (OHL) operation efficiency is more than ever considered as a very critical issue. This is because power losses have recently acquired an extra cost due to the CO₂ release penalty. It is well known that a good portion of the electricity required to operate a power grid is spent as OHL power losses. In this paper the key points of the maximum OHL transmission-efficiency theory are reviewed. OHL loading enabling the maximum transmission efficiency is given. With a case study it is then shown how to optimize the double-circuit OHL transmission-efficiency for the periods of OHL off-peak loading. The OHL transmission-efficiency vs. OHL loading curves of the OHL is presented and the change in the character from capacitive to inductive with an increasing OHL load is illustrated. Potential transmission-efficiency gains in percentage points are calculated. Conclusions of practical importance are drawn both for OHL design purposes as well as for its operation optimization.

1 UVOD

Znano je, da se v elektroenergetskem sistemu približno 3 % proizvedene električne energije izgubi pri transportu po prenosnem omrežju, medtem ko izgube na distribucijskem omrežju znašajo približno 6 %. Električne izgube 1000 km dolgega nadzemnega voda znašajo 6 %. Približno polovica vseh izgub na prenosnem omrežju gre na račun izgub na visokonapetostnih daljnovodih. Stroške teh izgub nosijo upravljavci prenosnih omrežij. Težnje po zmanjšanju izgub so dandanes čedalje izrazitejše, predvsem zaradi omejitev na dereguliranem trgu in dodatnih stroškov, ki jih prinašajo emisijski kuponi za CO₂.

Izkoristek daljnovoda je odvisen od njegove obremenitve. Izkoristek se giblje od vrednosti nič, ko je daljnovod napajan, vendar neobremenjen, do maksimalne vrednosti. Ko je daljnovod nazivno obremenjen, je njegov izkoristek dokaj visok. Kot bo pojasnjeno v nadaljevanju, obstaja določena karakteristična obremenitev, pri kateri ima daljnovod maksimalni izkoristek. To pomeni, da večja ko je razlika med dejansko in karakteristično obremenitvijo,

večja je razlika med dejanskim in maksimalnim mogočim izkoristkom.

Pri nizki do srednji obremenitvi dvosistemskega daljnovođa lahko (kot bo razvidno v 3. poglavju) izkoristek prenosa električne energije povečamo s tem, da izberemo, ali bo obremenitev porazdeljena med oba sistema ali pa bo obremenjen le en sistem. Pri tem je pomembno razmerje med dejansko in karakteristično obremenitvijo, ki vpliva na izkoristek prenosa.

2 ELEMENTI IZ TEORIJE MAKSIMALNEGA IZKORISTKA PRENOSA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Leta 1994 je avtor izčrpneje predstavil teorijo o maksimalnem izkoristku prenosa električne energije po nadzemnem vodu [1]. V tem poglavju bodo prikazani le elementi, ki so bistveni za ta članek, začenši z dobro poznanimi enačbami za dolg nadzemni vod, katerega začetek v enačbah označimo z indeksom 1 in konec z 2:

$$V_1 = A \odot V_2 + B \odot I_2$$

$$I_1 = C \odot V_2 + A \odot I_2$$

kjer so V fazna napetost nadzemnega voda, I tok po njem, A , B , in C so t. i. posplošene konstante simetričnega daljnovođa in so podane z naslednjimi izrazi:

$$A = \cosh(\gamma l)$$

$$B = Z_0 \cdot \sinh(\gamma l)$$

$$C = \frac{\sinh(\gamma l)}{Z_0}$$

Izražene so s parametri daljnovođa: karakteristično impedanco daljnovođa Z_0 , konstanto širjenja γ , in dolžino l .

Maksimalni izkoristek daljnovođa se izračuna z enačbo:

$$\eta_{\max} = \frac{|A|^2 + \operatorname{Re}(BC^*) - \sqrt{4 \operatorname{Re}(AC^*) \operatorname{Re}(BA^*) - \operatorname{Im}^2(BC^*)}}{2 \operatorname{Re}(BA^*)}$$

kjer: “ l ” označuje magnitudo kompleksnega števila, Re in Im označujeta realni in imaginarni del kompleksnega števila in zvezdica “ $*$ ” konjugirano kompleksno vrednost.

Maksimalni izkoristek prenosa dosežemo, ko je magnituda impedance bremena enaka:

$$\zeta = \sqrt{\frac{\operatorname{Re}(BA^*)}{\operatorname{Re}(AC^*)}}$$

in sinus faznega kota θ enak:

$$\sin \theta = -\frac{\operatorname{Im}(BC^*)}{2 \sqrt{\operatorname{Re}(AC^*) \operatorname{Re}(BA^*)}}$$

Če rečemo, da je V_L napetost daljnovođa na obremenjeni strani, potem je obremenitev daljnovođa glede na maksimalni izkoristek prenosa enaka:

$$P_e = V_L^2 \frac{|A|^2 + \operatorname{Re}(BC^*) - \eta_{\max}}{2 \operatorname{Re}(BA^*)}$$

Izkaže se, da karakteristična obremenitev nadzemnega voda P_e , izračunana samo iz električnih parametrov voda brez upoštevanja dejanske obremenitve, določa, kdaj je dosežen maksimalni izkoristek prenosa.

3 KRIVULJE IZKORISTKA PRENOSA

Za primer vzamemo 220 kV daljnovod z dolžino 250 km in naslednjimi parametri:

$$\gamma l = 0.2756 \angle 85^\circ$$

$$Z_0 = 408.25 \angle -4^\circ \Omega$$

$$A = 0.963 \angle 0.387^\circ$$

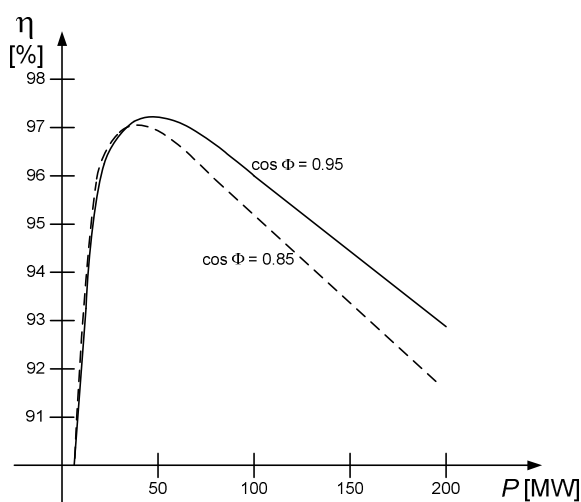
$$B = 111.044 \angle 81.13^\circ \Omega$$

$$C = 6.66 \cdot 10^{-4} \angle 89.13^\circ \text{ S}$$

Za ta daljnovod znaša maksimalni izkoristek prenosa 97,13 %, kar je izračunano z enačbo, podano v prejšnjem poglavju. To pomeni, da je ne glede na obremenitev ta izkoristek prenosa največji mogoči. Z obremenitvijo daljnovođa izkoristek prenosa pade (slika 1). Karakteristična obremenitev P_e za ta daljnovod (glede na maksimalni izkoristek prenosa) znaša:

$$P_e = 41.31 \text{ MW.}$$

Za dvosistemski daljnovod je ta vrednost dvakrat večja, torej 82,62 MW. Iz tega sledi, da se tedaj, ko je dvosistemski daljnovod z zgoraj podanimi parametri obremenjen z več kot 83 MW, izkoristek prenosa poviša, če je breme enakomerno porazdeljeno med oba sistema. To velja ne glede na faktor obremenitve, kar tudi vidimo pomočjo krivulj izkoristka prenosa (Transmission Efficiency Curves - TEC) na sliki 1.



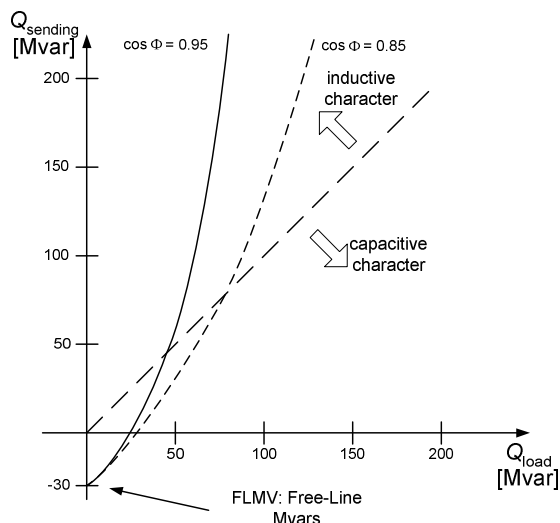
Slika 1: Krivulje izkoristka prenosa

Krivulji izkoristka prenosa na sliki 1 veljata za en sistem daljnovoda, ki je bil podan kot primer. Krivulji sta podani za faktorja obremenitve 0,85 in 0,95. Vidimo, da bi pri obremenitvi le enega sistema dvosistemskega daljnovoda z močjo 200 MW in faktorjem obremenitve 0,85 znašal izkoristek prenosa 91,24 %. Pri obremenitvi obeh sistemov (vsak po 100 MW) pa bi izkoristek znašal 95,21 % (približno 4 % večji izkoristek). Če obremenitev daljnovoda znaša 40 MW in je porazdeljena na oba sistema (vsak po 20 MW), znaša izkoristek prenosa 96,32 %. Če pa to moč prenašamo le po enem sistemu, znaša izkoristek 97 % (blizu maksimuma).

Zanimiva lastnost krivulj izkoristka prenosa je njihov premik (slika 1) s spremembo ohmske upornosti daljnovoda. Na primer, če upornost zmanjšamo za faktor 2, se karakteristična obremenitev občutno poveča in znaša $P_e = 57,63$ MW. Posledično se krivulja izkoristka premakne, tako da v tem drugem primeru znaša maksimalni izkoristek prenosa 97,97 %.

4 KRIVULJE SPREMEMBE KARAKTERJA NADZEMNIH VODOV

Če spreminjamo obremenitev nadzemnega voda od nizke do visoke, se njegov karakter spremeni od kapacitivnega do induktivnega. V primeru, uporabljenem v tem članku, je ta sprememba ponazorjena s krivuljami sprememb karakterja nadzemnega voda (Overhead Line Change-of-character Curves - OLCC) na sliki 2.



Slika 2: Krivulje spremembe karakterja nadzemnih vodov

Vsaka od OLCC-krivulj velja za določen faktor obremenitve. Krivulji na sliki 2 predstavljata faktor obremenitve 0,95 in 0,85 induktivno. S slike 2 je razvidno, da je karakter nadzemnega voda kapacitiven za manjše obremenitve in se spremeni v induktivnega z naraščanjem le-te. Prekinjena črta pomeni mejo nevtralnosti karakterja nadzemnega voda (Overhead Line Neutral Line - OLNL).

Presečišču krivulj OLCC za faktor obremenitve 0,95 in OLNL ustreza bremenu moči 120 MW (kar je nekoliko več, kot znaša naravna moč voda PSIL ~ 119 MW), pri katerem je pritekajoča in odtakajoča jalova moč enaka 74,5 MVar. Zanimiva lastnost OLCC-krivulj je, da vse konvergirajo k točki na abscisni osi (odtekajoča jalova moča), ki pomeni jalovo moč neobremenjenega daljnovoda (Free-Line Mvars - FLMV). Numerična vrednost te točke je enaka količini jalove moči, ki priteka v neobremenjen daljnovod pri nazivni napetosti. V obravnavanem primeru znaša vrednost v točki FLMV -33,48 MVar (slika 2).

5 DOLOČANJE MAKSIMALNEGA IZKORISTKA DVOSISTEMSKEGA DALJNOVODA

V drugem poglavju je bila z ustrezno enačbo podana karakteristična obremenitev (P_e) za en sistem dvosistemskega daljnovoda, ki ustreza maksimalnemu izkoristku prenosa. Za oba sistema bi bila karakteristična obremenitev enaka:

$$P_{dl} = 2 \cdot P_e$$

Enačbo lahko uporabimo kot merilo za določanje maksimalnega izkoristka prenosa po dvosistemskem daljnovodu. Za lažjo ponazoritev spet uporabimo primer dvosistemskega daljnovoda s parametri, podanimi v 3. poglavju. V tem primeru lahko kot merilo vzamemo vrednost $P_{dl} \approx 83$ MW. Ko je moč prenosa večja od te

vrednosti, je treba za dosego maksimalnega izkoristka obremenitev porazdeliti med oba sistema. Na primer za obremenitev moči 200 MW in s faktorjem obremenitve 0,85 induktivno znaša izkoristek prenosa po obeh sistemih 95,21 %, ko pa celotno breme nosi le en sistem, izkoristek prenosa znaša le 91,24 %. Po drugi strani je tedaj, ko je treba prenesti le 50 MW, bolje uporabiti le en sistem (izkoristek 96,9 %), kot pa breme porazdeliti med oba sistema (izkoristek 96,7 %). Za večsistemске daljnovode lahko kot merilo za določanje maksimalnega izkoristka analogno uporabimo izraz:

$$P_{ml} = m \circ P_e$$

kjer m označuje število sistemov.

6 NADALJNJE RAZISKAVE

Vpliv obstoječih daljnovodov na okolje je dandanes pomembna tema, tako da bi bile nadaljnje raziskave o električnih izgubah nadzemnih vodov in s tem povezanimi izpusti CO₂ upravičene. Vpliv na okolje bi bilo mogoče zmanjšati z izbiro ustreznih parametrov daljnovodov pri njihovem načrtovanju, kot tudi z novimi pristopi pri kompenzaciji, s katerimi bi se zmanjšale obratovalne izgube.

7 SKLEPI

V članku smo obravnavali zelo pomemben problem s področja učinkovitosti prenosa električne energije. Uvodoma smo povzeli nekatere elemente teorije o maksimalnem izkoristku prenosa električne energije po nadzemnem vodu. V nadaljevanju smo prikazali, kako se glede na maksimalni izkoristek prenosa odločiti, ali breme porazdeliti med oba sistema dvosistemskega daljnovoda ali ne. Za določanje maksimalnega izkoristka prenosa po dvo- ali večsistemskem daljnovodu smo predlagali preprosto metodo. Izkazalo se je, da bi ob upoštevanju predlaganega merila dosegli občutno izboljšanje izkoristka prenosa. Prikazali smo tudi spremembo karakterja daljnovoda od induktivnega h kapacitivnemu v odvisnosti od njegove obremenitve. Predlagamo nadaljnje raziskave na področju določanja ustreznih parametrov daljnovodov pri njihovem načrtovanju kot tudi na področju kompenzacije.

LITERATURA

- [1] T. M. Papazoglou, Maximum efficiency of interconnected transmission lines, IEE Proceedings Generation Transmission Distribution, Vol. 141, No. 4, pp. 353–356, July 1994

Thales M. Papazoglou se je rodil leta 1945 v Heraklionu (Kreta, Grčija). 35 let je bil profesor elektroenergetike in direktor laboratorija za elektroenergetske sisteme na kretskem tehnološko-izobraževalnem inštitutu. Mnogo let je bil (in še vedno je) zelo dejaven član organizacije CIGRE, v okviru katere je aktivno deloval v desetih delovnih skupinah, trenutno pa je sklicatelj delovne skupine C2.13 (Voltage and Var Support in System Operation). Tekom let je objavil številne članke in učbenike ter aktivno sodeloval na najpomembnejših mednarodnih konferencah. Več let je bil vodilni član mednarodnega komiteja konference Power Grid Europe in trenutno konference UPEC. Je sklicatelj nadzornega odbora mednarodne konference DEMSEE, ki jo je ustanovil leta 2005.