

# Medsebojni vplivi med več daljnovodnimi sistemi

Marijan Koželj

E-pošta: mn.kozelj@gmail.com

**Povzetek.** Z medsebojnimi induktivnostmi in medsebojnimi kapacitivnostmi brezžično prek izolacije (izolacijski materiali, zrak, vakuum) vplivajo drug na drugega tokovi in napetosti v vodnikih treh faz naših elementov v elektroenergetskih sistemih (EES). Višje ko so napetosti in tokovi, bolj izraziti so ti vplivi. Pri nadzemnih prostih vodih (daljnovodi, DV) s 110 kV je to manj izrazito, na DV 400 kV, posebno še dvosistemskih (DV  $2 \times \dots$  kV), so ti pojavi vredni temeljitega proučevanja, posebno še, če gre za povezave med več partnerji, ki medsebojno obračunavajo pretoke moči in energij.

**Ključne besede:** nadzemni vodi, medsebojne induktivnosti, medsebojne kapacitivnosti, brezžični prenos električnih moči

## Mutual Impacts between Circuits of the Double-Circuit ACHVOH Line

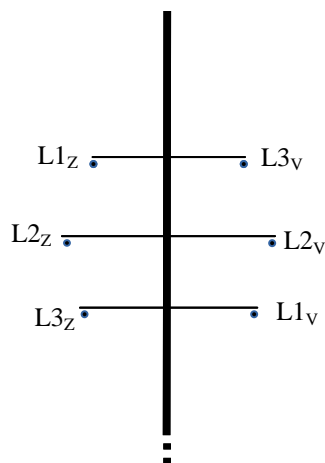
In power systems, the currents and voltages in three phase conductors interact wirelessly by mutual inductances and capacitances through the insulation (insulation materials, air, vacuum). Higher the voltages and the currents are the more pronounced these effects are. They are less pronounced in the case of 110 kV overhead power lines compared to the 400 kV ones, especially the double-circuit lines ( $2 \times DV \dots$  kV), for which these phenomena should be thoroughly studied, especially when it comes to the links between more partners accounting the power and energy flows to each other.

## 1 UVOD

Glave stebrov DV  $2 \times 400$  kV so pri nas različne. Najpogostejša je oblika "sod", kot je nakazano v simbolični risbi, slika 1. Pogosta je še oblika "smreka". Na DV-jih 400 kV so vodniki snopasti, po dva ali trije v snopu. Izvajanje je enako za druge oblike glav, številčni rezultati pa so drugačni.

## 2 ZNAČILNI PRIMERI

Razporeditev vodnikov (dispozicija) daljnovodnega (DV-nega) sistema na levi strani glave (indeks Z) je od zgoraj navzdol  $L1_Z$ ,  $L2_Z$ ,  $L3_Z$ , faze se tudi časovno pomikajo od zgoraj navzdol, proti tlom, proti temeljem stebrov. Na desni strani (indeks V) je od zgoraj navzdol zaporedje  $L3_V$ ,  $L2_V$ ,  $L1_V$ , torej je smer v časovnem zaporedju od spodaj navzgor, od zemlje proč. V takšnih primerih se ne moremo izogniti dispoziciji, da sta na isti izmed konzol fazi istoimenski na obeh straneh stebra.



Slika 1: Dispozicija vodnikov na dvosistemskem steburu "sod"

Dispozicija vpliva na več obratovalnih lastnosti, na:

- asimetrije v električnih tokovih v vseh fazah obeh sistemov
- dodatne ohmske izgube zaradi asimetrij v tokovih
- brezžični prenos delovnih (in jalovih) moči in s tem energij med fazami istega sistema in med sistemoma, med levim (Z) in desnim (V) trifaznim sistemom; ta prenos je bil v preteklih desetletjih deležen premalo pozornosti.

Pri tem je treba v mislih imeti tudi merilne pogoške merilnih kompletov na obeh koncih vsakega DV-nega sistema.

Naj se ne spregledajo vplivi DV-ja zelo visokega napetostnega nivoja na (deloma) vzporedne vode za veliko nižje napetosti in tokove, kamor inducirajo moteče in nevarne napetosti in električne tokove.

Značilne možnosti glede zaporedij levo (Z) in desno (V) so (slika 1 prikazuje primer C):

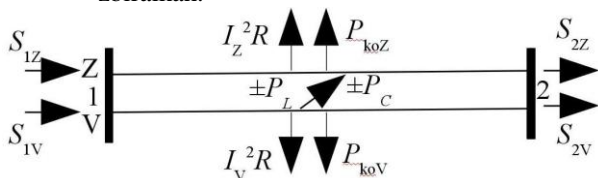
A)  $L1_Z \ L1_V$    B)  $L1_Z \ L3_V$    C)  $L1_Z \ L3_V$   
 $L2_Z \ L2_V$     $L2_Z \ L1_V$     $L2_Z \ L2_V$   
 $L3_Z \ L3_V$     $L3_Z \ L2_V$     $L3_Z \ L1_V$

Brez izračuna, po občutku, si lahko mislimo, da bodo asimetrije tokov, obeh sistemov skupaj na zbiralkah, največje v primeru A) in manjše v primeru B), za katerega izračuni pokažejo, da je dokaj dobro simetričen, če sta oba začetka in oba konca DV-ja na obeh straneh na istih zbiralkah, kot je v enočrtni shemi slike 2. Kombinacij dispozicij, če opravimo vse mogoče premestitve, transpozicije, je 36, od teh jih je šest značilnih skupin. Kombinatorika da ogromno število kombinacij glede na to, katera faza je na vrhu itd., če so neke na trasi še kakšne transpozicije ter če napetosti na zbiralkah niso povsem simetrične, kateri vodnik je priključen na katero fazno napetost. V praksi se število kombinacij omeji z drugimi kriteriji, proučimo le primerne dispozicije.

### 3 MOČI NA DV 2×... kV

DV-ji so večinoma opremljeni s številnimi meritvami, med njimi  $U$ (kV),  $I$ (A),  $P$ (MW),  $Q$ (Mvar), meritev in izračun temperatur  $T$ (°C) vodnikov vzdolž trase. Izmerjeni razliki  $P_{1Z}-P_{2Z}$  in  $P_{1V}-P_{2V}$  se kažeta zaradi:

- ohmskih izgub  $I^2R$ , kjer je zaradi  $R(T)$  treba upoštevati temperature  $T$  v vodnikih od postaje 1 do postaje 2,
- izgub zaradi korone in odvodnosti  $P_{ko}$ , ki so pri dani konfiguraciji DV-ja močno odvisne od trenutne napetosti ( $\sim U^8$ ), stanja površin vodnikov in vremenskih razmer, ki so torej iz teh podatkov težko določljive,
- brezžičnih izmenjav moči med sistemoma  $\pm P_C + \pm P_L$ , kjer imata pri danem DV 2×400 kV  $P_C$  in  $P_L$  stalno nasprotno ali stalno isto smer, če sta oba sistema na obeh koncih na istih zbiralkah.



Slika 2: DV-na sistema obojestransko na istih zbiralkah

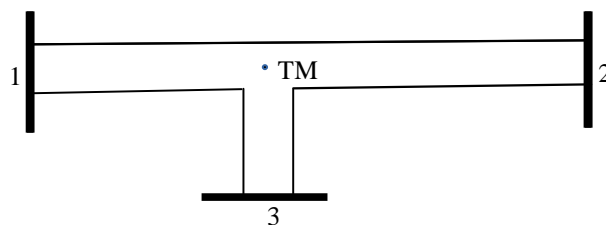
Brezžični izmenjavi  $P_C$  in  $P_L$  sta funkciji dimenzij, tj. prerezov vodnikov, enojni ali snopasti, razdalj v glavah stebrov, malo odvisni od obešalnih višin vodnikov. Odvisni sta od kvadrata trenutne obratovalne napetosti ( $U^2$ ) in zmnožka tokov v obeh sistemih ( $I_Z \cdot I_V$ ). Če gre za stanje po sliki 2, je razmerje med bremenskima tokovoma  $I_Z$  in  $I_V$  stalno, po velikosti in faznem kotu med njima, ne glede na to, ali gre za pretoke delovne ali

jalove obremenitve skozi oba sistema DV-ja vzporedno. Računamo lahko s kvadratom srednje vrednosti toka, če  $P_L$  poznamo pri neki obremenitvi  $S_{1Z}+S_{1V}$ , pri pripadajočih tokovih. Če sta  $I_Z$  in  $I_V$  iz sistemov z različnih zbiralk, je treba zmnožek korigirati s  $\cos(\psi_Z - \psi_V)$ , kjer sta  $\psi_Z$  in  $\psi_V$  kota tokov proti referenčnemu kotu - to poenostavitev in dejanske vrednosti je treba verificirati s kompleksnimi raziskavami vsakega konkretnega primera vodnikov in glav stebrov posebej.

$P_C+P_L$  pri obračunu pretokov energij ne moti, če sta oba sistema na obeh koncih na istih zbiralkah in istih lastnikov, saj se ta moč v seštevku obeh obračunskih števecov z obeh DV-nih sistemov eliminira. Gre le za razumevanje vzroka razlik med meritvama na obeh koncih istega DV-nega sistema, in za preverjanje, da ne gre za nedopustno velikost pogreškov merilne opreme.  $P_C+P_L$  namreč lahko na 400 kV doseže velikostni razred več MW.

### 4 SISTEMI DV-JA NISO NA OBEH KONCIH NA ISTIH ZBIRALKAH

Če bi po sliki 2 oba sistema ne bila na obeh straneh na istih zbiralkah, bi tokovi sistema Z in sistema V ne bili v stalnem razmerju niti po velikosti niti po faznem kotu. Razlike napetosti med konci (na istem napetostnem nivoju 400 kV) bi ne bile močno različne, ker bi večje razlike pognale preobremenitvene električne tokove. Morali pa bi ugotoviti zakonitosti odvisnosti  $P_L$  od različnosti v tokovih  $I_Z$  in  $I_V$  v velikostih in faznih kotih.



Slika 3: DV-ni sistemi na različnih zbiralkah

V primeru slike 3 so zbiralke 1, 2, 3 na različnih lokacijah, morda pri treh različnih lastnikih, ki medsebojno obračunavajo.

Imamo tri DV-ne sisteme, 1-2, 2-3, 3-1 ter do razcepišča, do trojnega mesta TM, šest odsekov 1-TM(-2), 1-TM(-3), 2-TM(-3), 2-TM(-1), 3-TM(-1), 3-TM(-2). Za vsak odsek posebej je treba meriti in določiti vse veličine, kot jih izkazuje že slika 2.

Za  $P_{ko}$  morda lahko dogovorimo razmerja deležev na vsakem sistemu po posameznem izmed šestih odsekov, ne moremo pa celotnih  $P_{ko}$  na celotnem sistemu vnaprej določiti. Če študijsko, le z malo napake, določimo algoritme za ohmske izgube, brezžične izmenjave  $P_C+P_L$ , merilne pogreške, lahko razlike med meritvami na vseh koncih DV-nih sistemov  $P_{12}-P_{21}$ ,  $P_{23}-P_{32}$ ,  $P_{31}-P_{13}$  dokaj točno pripišemo  $P_{ko12}$ ,  $P_{ko23}$ ,  $P_{ko31}$  + majhnim vsotam preostalih merilnih pogreškov pri danih

obremenitvah + vsotam majhnih pogreškov pri izračunih  $P_C+P_L+I^2R$ .

## 5 SKLEPI

Za dano konfiguracijo DV-ja vzdolž vse trase, za vse odseke, npr. po sliki 3, je študijsko treba najti algoritme za izračun  $P_C+P_L$ , izdelati računalniški program, z ustreznimi izmerjenimi vhodnimi podatki, med obratovanjem sproti izračunavati deleže prenesenih in izgub moči ter vse to sproti seštevati v energijsko bilanco obračunskega obdobja. To je treba rešiti pred začetkom pogajanj med morebitnimi različnimi partnerji, že prej, ob sami nameri, da je vsakomur že vnaprej nesporno jasno, kakšni so poštene, čisti fizikalni odnosi.

*Zahvala: V čast in hvaležen spomin pokojnemu kolegu Valentinu Čeponu (\*1937 †2009)*

## LITERATURA

- je obsežna, navajam le avtorjevo kot dopolnitev zgornjim izvajanjem:

- [1] Koželj, M., Sinigoj, A., Željeznov, M., Cestnik, B.: Medsebojni vplivi med sistemoma dvosistemskega daljnovoda. EVEA2, vol.59, št. 3–4, str. 201–208, Ljubljana, 1992.
- [2] M., Koželj, nekaj prispevkov drugih avtorjev: Medsebojni vplivi med več daljnovodnimi sistemi. ELES, Ljubljana, maj 1997, 1. in 2. zvezek 1370 (=44+1326)×A4
- [3] Koželj, M.: Gegenseitige Einflüsse zwischen den Systemen der 380-kV-Doppelleitung Kainachtal-Maribor. Journal, H.7-8, Juli-August 1998, S. 54-60, AT Wien
- [4] Koželj, M.: Hipotetske nesimetrije u strujama dalekovoda 400, 220 i 110 kV u Sloveniji (Izveštaj o nekim rezultatima istraživanja "Medusobni utjecaji između više dalekovodnih sistema"). Energija 2, g.47, br. 2, HR Zagreb, 1998, str. 123–132.
- [5] Koželj, M.: Hipotetične asimetrije v tokovih po daljnovodih 400, 220, 110 kV v Sloveniji, Medsebojni vplivi med več daljnovodnimi sistemi, konferenca Cigré, Laško, maj 2013, 12×A4.

**Marijan Koželj** je na Fakulteti za elektrotehniko diplomiral leta 1961, magistriral leta 1971, bil asistent pri Katedri za električne stroje v letih 1963–1977, nato v elektrogospodarstvu – obratovanje EES, leta 1999 upokojen; še vedno se intenzivno ljubiteljsko ukvarja z (elektro)energetiko.