

## ИЗРАЗИ ЗА ПРОМЕНУ НАПОНА НА МЕСТУ ПРИКЉУЧЕЊА ГЕНЕРАТОРА НА ДИСТРИБУТИВНИ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ

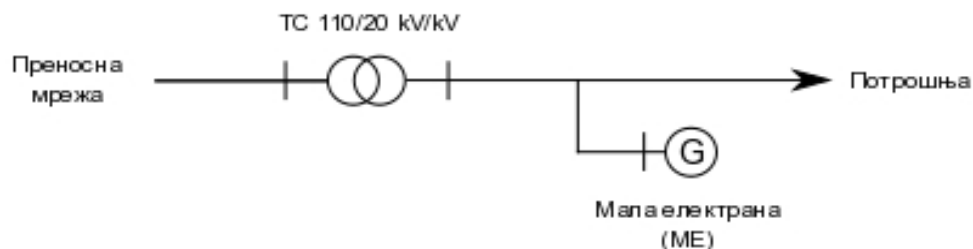
Д. Поповић, "Електровојводина" д.о.о, Нови Сад, Србија

### УВОД

Приликом прикључења генератора (електрана) на дистрибутивни систем електричне енергије (у даљем тексту: ДСЕЕ) проверава се промена напона у прелазном режиму (напонски удар приликом укључења и искључења генератора). Провера се врши путем израза за критеријум дозвољене снаге према "Правилима о раду дистрибутивног система" [1]. Осим тога, у последњој верзији "Техничких Препорука 16" [2] препоручује се провера додатних критеријума преко израза који у својој основи такође имају промену напона у прелазном режиму. Исти или слични изрази се користе и у другим земљама Европе за проверу критеријума за прикључење електрана на ДСЕЕ.

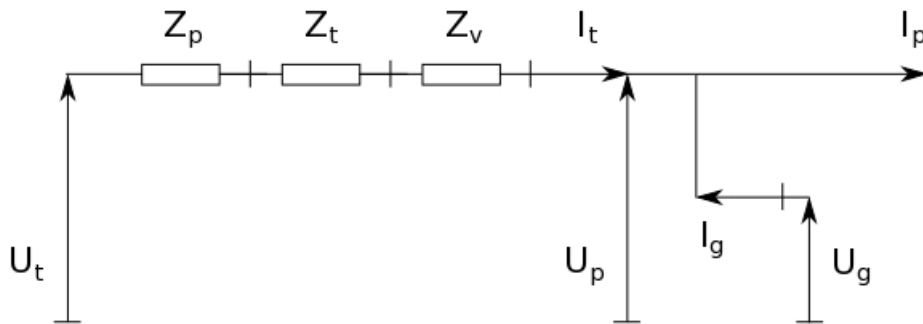
Приликом практичне примене датих израза указала се потреба за информацијама о томе како су дати изрази добијени. "Правила о раду дистрибутивног система" и "Техничке Препоруке 16" такве информације не садрже. Пошто се у домаћим и страним правилима за прикључење генератора на ДСЕЕ не наводи поступак одређивања израза који се користе за проверу критеријума, у овом раду је дат општи поступак добијања тачног израза за промену напона на месту прикључења генератора из кога су математичким трансформацијама уз увођење одговарајућих претпоставки добијени изрази који се могу срести у домаћим и страним правилима за прикључење генератора.

Посматра се део ДСЕЕ састављен од једног ЕТ-а 110/20 kV/kV, једног 20 kV вода, групе потрошача који се напајају преко тог извода (вода) и једног генератора прикљученог на посматрани вод. Посматрани део ДСЕЕ прикључен је на преносну мрежу. На слици 1 приказана је упрошћена шема дела ДСЕЕ који се посматра.

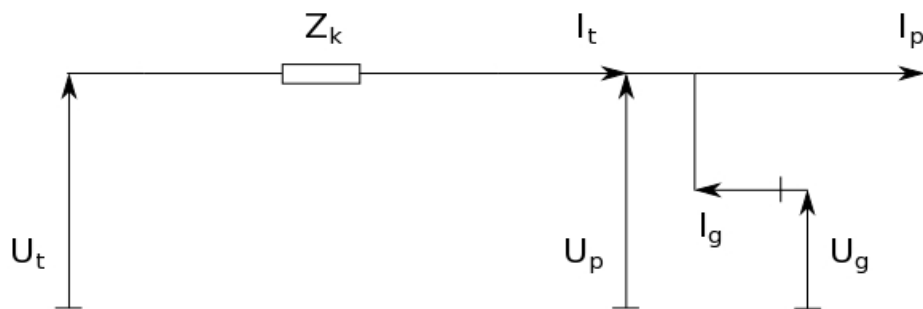


Слика 1 - упрошћена шема дела ДСЕЕ са прикљученим генератором

На слици 2 и слици 3 приказан је електрични модел посматраног дела ДСЕЕ који је полазна основа за даље прорачуне.



Слика 2 - електрични модел дела ДСЕЕ са прикљученим генератором



Слика 3 - електрични модел дела ДСЕЕ са прикљученим генератором са укупном импедансом  $Z_k$

На сликама 2 и 3 обележене су одговарајуће комплексне фазне електричне величине са усвојеним референтним смеровима које имају следеће значење:

- $Z_p$  - импеданса преносне мреже сведена на 20 kV
- $Z_t$  - импеданса ЕТ-а 110/20 kV/kV сведена на 20 kV
- $Z_v$  - импеданса вода до тачке прикључења генератора
- $Z_k$  - укупна импеданса до тачке прикључења генератора ( $Z_p + Z_t + Z_v$ )
- $U_t$  - напон преносне мреже сведен на 20 kV
- $U_p$  - напон на месту прикључења генератора
- $U_g$  - напон генератора
- $I_t$  - струја кроз ЕТ и вод до места прикључења генератора сведена на 20 kV
- $I_g$  - струја генератора
- $I_p$  - струја потрошача на изводу

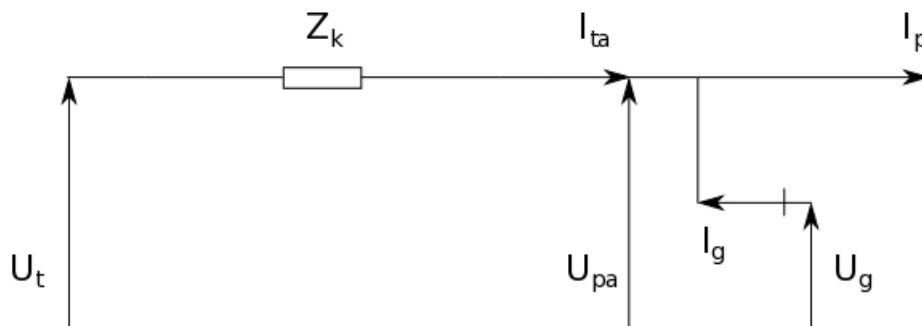
Предмет даљег рада је да се одреди израз за разлику напона у релативним јединицама ( $\Delta u$ ) између вредности напона у тачки прикључења генератора када је генератор у погону и када је ван погона, што је у суштини промена напона која се јавља у тачки прикључења генератора када генератор уђе у погон или прекине свој рад.

### ИЗВОЂЕЊЕ ИЗРАЗА ЗА ПРОМЕНУ НАПОНА

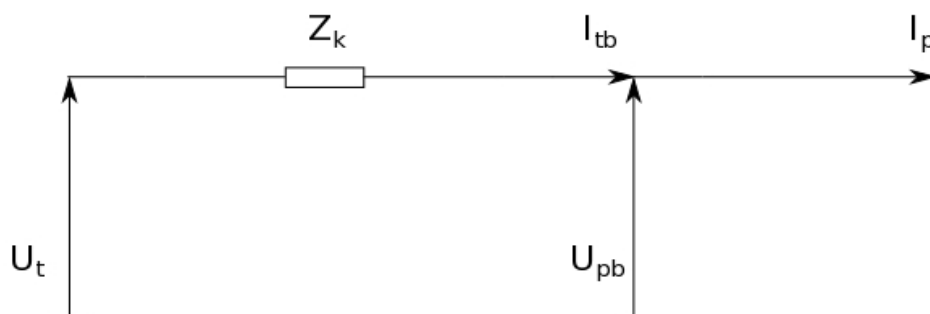
Посматраће се два независна електрична модела истог дела ДСЕЕ. Један модел је са прикљученим генератором а други без њега.

На слици 4 приказан је електрични модел посматраног дела ДСЕЕ са прикљученим генератором који ће бити означен као "а" режим. Електричне величине на овом моделу имају исто значење као и на моделу са слике 3, с тим да величине са супскриптом "а" имају специфичне вредности за овај режим ("а" режим) које се разликују од вредности еквивалентних величина у режиму када генератор није прикључен. Електричне величине без сапскрипта "а" имају идентичне вредности и у режиму без генератора.

На слици 5 приказан је електрични модел посматраног дела ДСЕЕ без прикљученог генератора који ће бити означен као "б" режим. Електричне величине на овом моделу имају исто значење као и на моделу са слике 3, с тим да величине са сапскриптом "б" имају специфичне вредности за овај режим ("б" режим) које се разликују од вредности еквивалентних величина у режиму када је генератор прикључен ("а" режим). Електричне величине без сапскрипта "б" имају идентичне вредности и у режиму са генератором ("а" режим).



Слика 4 - електрични модел дела ДСЕЕ са прикљученим генератором ("а" режим)



Слика 5 - електрични модел дела ДСЕЕ без прикљученог генератора ("б" режим)

За режим "а" важе следећи изрази у комплексном облику:

$$\underline{U}_t = \underline{Z}_k \underline{I}_{ta} + \underline{U}_{pa}$$

$$\underline{I}_p = \underline{I}_{ta} + \underline{I}_g$$

$$\underline{U}_{pa} = \underline{U}_g$$

$$\underline{U}_{pa} = \underline{U}_t - \underline{Z}_k \underline{I}_{ta}$$

$$\underline{I}_{ta} = \underline{I}_p - \underline{I}_g$$

$$\underline{U}_{pa} = \underline{U}_t - \underline{Z}_k (\underline{I}_p - \underline{I}_g)$$

$$\underline{U}_{pa} = \underline{U}_t - \underline{Z}_k \underline{I}_p + \underline{Z}_k \underline{I}_g$$

За режим "б" важе следећи изрази у комплексном облику:

$$\underline{U}_t = \underline{Z}_k \underline{I}_{tb} + \underline{U}_{pb}$$

$$\underline{I}_{tb} = \underline{I}_p$$

$$\underline{U}_{pb} = \underline{U}_t - \underline{Z}_k \underline{I}_{tb}$$

$$\underline{U}_{pb} = \underline{U}_t - \underline{Z}_k \underline{I}_p$$

Комбинацијом датих израза и одговарајућим сменама добија се израз за разлику напона на месту прикључења генератора између режима "а" и режима "б" у комплексном облику.

$$\underline{U}_{pa} - \underline{U}_{pb} = \underline{U}_t - \underline{Z}_k \underline{I}_p + \underline{Z}_k \underline{I}_g - \underline{U}_t + \underline{Z}_k \underline{I}_p$$

$$\underline{U}_{pa} - \underline{U}_{pb} = \underline{Z}_k \underline{I}_g$$

$$\underline{\Delta U} = \underline{U}_{pa} - \underline{U}_{pb} = \underline{Z}_k \underline{I}_g$$

Полазећи од датог израза извешће се израз за разлику **модула** напона у релативним јединицама на месту прикључења генератора између вредности напона у режиму "а" и режиму "б".

Из претходног израза се добија:

$$\underline{U}_{pb} = \underline{U}_{pa} - \underline{Z}_k \underline{I}_g$$

Усваја се следеће:

1. Напон на месту прикључења генератора у режиму "а" ( $U_{pa}$ ) је на реалној оси, односно нема имагинарног дела.
2. Угао " $\alpha$ " је угао импедансе  $Z_k$  ( $\text{tg } \alpha = X_k/R_k$ )
3. Угао " $\varphi$ " је угао између напона и струје генератора, односно  $\cos \varphi$  је фактор снаге генератора.
4.  $U_{pa}$ ,  $I_g$  и  $Z_k$  су модули односно ефективне вредности одговарајућих комплексних величина

Пошто је усвојено да је  $U_{pa}$  на реалној оси даље је потребно одредити израз за модуо  $U_{pb}$  како би се могла одредити тражена разлика. Уваживши наведено из претходног израза се добија:

$$\underline{U}_{pb} = \underline{U}_{pa} - \underline{Z}_k e^{j\alpha} \underline{I}_g e^{j\varphi} = \underline{U}_{pa} - \underline{Z}_k \underline{I}_g e^{j(\alpha+\varphi)}$$

$$\underline{U}_{pb} = \underline{U}_{pa} - \underline{Z}_k \underline{I}_g [\cos(\alpha + \varphi) + j \sin(\alpha + \varphi)] = \underline{U}_{pa} - \underline{Z}_k \underline{I}_g \cos(\alpha + \varphi) - j \underline{Z}_k \underline{I}_g \sin(\alpha + \varphi)$$

На основу датих израза добија се израз за модуо  $U_{pb}$ .

$$|\underline{U}_{pb}| = \sqrt{[\underline{U}_{pa} - \underline{Z}_k \underline{I}_g \cos(\alpha + \varphi)]^2 + [\underline{Z}_k \underline{I}_g \sin(\alpha + \varphi)]^2}$$

Израз за разлику модула напона на месту прикључења генератора између вредности модула напона у режиму "а" и режиму "б" даље гласи:

$$\underline{\Delta U} = |\underline{U}_{pa}| - |\underline{U}_{pb}| = \underline{U}_{pa} - \sqrt{[\underline{U}_{pa} - \underline{Z}_k \underline{I}_g \cos(\alpha + \varphi)]^2 + [\underline{Z}_k \underline{I}_g \sin(\alpha + \varphi)]^2}$$

Уваживши раније наведено  $U_{pa}=U_g$ , добија се:

$$\underline{\Delta U} = \underline{U}_g - \sqrt{[\underline{U}_g - \underline{Z}_k \underline{I}_g \cos(\alpha + \varphi)]^2 + [\underline{Z}_k \underline{I}_g \sin(\alpha + \varphi)]^2}$$

Дељењем претходног израза са ефективном фазном вредношћу називног напона мреже добија се израз за разлику модула напона на месту прикључења генератора између вредности модула напона у режиму "а" и режиму "б" у релативним јединицама.

$$\underline{\Delta u} = \frac{\underline{\Delta U}}{\underline{U}_n} = \frac{\underline{U}_g - \sqrt{[\underline{U}_g - \underline{Z}_k \underline{I}_g \cos(\alpha + \varphi)]^2 + [\underline{Z}_k \underline{I}_g \sin(\alpha + \varphi)]^2}}{\underline{U}_n}$$

На овом месту ће се увести две претпоставке:

1. Напон генератора једнак је називном напону генератора и називном напону мреже, односно  $U_g=U_{ng}=U_n$ .
2. Струја генератора једнака је називној струји генератора, односно  $I_g=I_{ng}$ .

Имајући у виду дате претпоставке, уз коришћење основних израза за привидну снагу:

$$S_k = 3U_n I_k = \frac{3U_n^2}{Z_k} = \frac{V_n^2}{Z_k}$$

$$S_{ng} = 3U_{ng} I_{ng}$$

при чему коришћене величине имају следеће значење:

$U_{ng}$  - називни напон генератора (ефективна фазна вредност)

$I_{ng}$  - називна струја генератора (ефективна фазна вредност)

$S_{ng}$  - називна снага генератора (ефективна вредност)

$U_n$  - називни напон мреже (ефективна фазна вредност)

$V_n$  - називни напон мреже (ефективна линијска вредност)

$I_k$  - струја кратког споја на месту прикључења генератора (ефективна фазна вредност)

$S_k$  - снага кратког споја на месту прикључења генератора (ефективна вредност)

добијају се следећи изрази:

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_n} = 1 - \sqrt{\left[1 - \frac{Z_k I_g \cos(\alpha + \varphi)}{U_n}\right]^2 + \left[\frac{Z_k I_g \sin(\alpha + \varphi)}{U_n}\right]^2}$$

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_n} = 1 - \sqrt{\left[1 - \frac{Z_k S_{ng} \cos(\alpha + \varphi)}{3U_n^2}\right]^2 + \left[\frac{Z_k S_{ng} \sin(\alpha + \varphi)}{3U_n^2}\right]^2}$$

$$\Delta u = 1 - \sqrt{\left[1 - \frac{Z_k S_{ng} \cos(\alpha + \varphi)}{V_n^2}\right]^2 + \left[\frac{Z_k S_{ng} \sin(\alpha + \varphi)}{V_n^2}\right]^2}$$

Добијени израз је израз за прорачун разлике модула напона у релативним јединицама на месту прикључења генератора између вредности напона у режиму "а" и режиму "б", односно разлике модула напона на месту прикључења генератора у режиму са генератором и без генератора.

Даљим математичким трансформацијама добија се још један израз еквивалентан претходном.

$$\Delta u = 1 - \sqrt{1 - 2 \frac{Z_k S_{ng}}{V_n^2} \cos(\alpha + \varphi) + \left(\frac{Z_k S_{ng}}{V_n^2}\right)^2 \cos^2(\alpha + \varphi) + \left(\frac{Z_k S_{ng}}{V_n^2}\right)^2 \sin^2(\alpha + \varphi)}$$

$$\Delta u = 1 - \sqrt{1 - 2 \frac{Z_k S_{ng}}{V_n^2} \cos(\alpha + \varphi) + \left(\frac{Z_k S_{ng}}{V_n^2}\right)^2}$$

Генератор може радити у капацитивном и у индуктивном режиму што се одражава на знак угла " $\varphi$ ". У складу са усвојеним референтним смеровима електричних величина (слика 3): уколико генератор предаје реактивну енергију у мрежу (капацитивни режим рада) угао " $\varphi$ " има негативну вредност, уколико генератор преузима реактивну енергију из мреже (индуктивни режим рада) угао " $\varphi$ " има позитивну вредност.

### ИЗРАЗИ КОЈИ СЕ КОРИСТЕ ЗА ПРОВЕРУ КРИТЕРИЈУМА ПРОМЕНЕ НАПОНА КОД ПРИКЉУЧЕЊА ГЕНЕРАТОРА

Из претходног израза је очигледно да је  $\Delta u$  веће ако је израз испод корена мањи. Собзиром да је за утврђено место прикључења и утврђен генератор који се прикључује, једина величина која је практично променљива је угао " $\varphi$ ". У складу са тим, израз испод корена је мањи уколико је  $\cos(\alpha + \varphi)$  већи. Следи да је критичан случај када је  $\cos(\alpha + \varphi) = 1$ , односно  $\alpha = -\varphi$ . За такав режим добија се следећи израз:

$$\Delta u = 1 - \sqrt{1 - 2 \frac{Z_k S_{ng}}{V_n^2} + \left(\frac{Z_k S_{ng}}{V_n^2}\right)^2} = 1 - \left(1 - \frac{Z_k S_{ng}}{V_n^2}\right) = \frac{Z_k S_{ng}}{V_n^2}$$

имајући у виду израз:

$$S_k = 3U_n I_k = \frac{3U_n^2}{Z_k} = \frac{V_n^2}{Z_k}$$

добија се:

$$\Delta u = \frac{S_{ng}}{S_k}$$

Овај израз је идентичан изразу за проверу критеријума дозвољене снаге за прикључење електрана на ДСЕЕ дефинисан правилима о раду дистрибутивног система када је полазна струја генератора једнака називној струји генератора, односно  $k=1$ . Очигледно је да се на исти начин, коришћењем полазне струје генератора уместо назначене струје генератора у наведеном извођењу уз смену  $I_p = kI_{ng}$ , добија израз:

$$\Delta u = k \frac{S_{ng}}{S_k}$$

који се, према "Правилима о раду дистрибутивног система", користи за проверу критеријума дозвољене снаге за прикључење електрана на ДСЕЕ у општем случају.

Овај израз даје максималну могућу промену напона ( $\Delta u$ ) за одређени генератор на одређеном месту прикључења. Дати израз даје гаранцију да рад генератора у било ком режиму неће приликом укључења и искључења створити разлику напона већу од утврђене. Такође је битно напоменути да дати израз важи за било који извор привидне снаге, без обзира на тип генератора, опсег стабилног рада генератора, способност регулације и примењеног система за регулацију рада генератора.

У препорукама других земаља се за прорачун  $\Delta u$  могу наћи и следећи изрази:

$$\Delta u = \frac{Z_k S_{ng}}{V_n^2} \cos(\alpha + \varphi)$$

и

$$\Delta u = \frac{S_{ng} (R_k \cos(\varphi) - X_k \sin(\varphi))}{V_n^2}$$

До ових израза се може доћи почевши од раније наведеног израза за  $U_{pb}$ :

$$U_{pb} = U_{pa} - Z_k I_g [\cos(\alpha + \varphi) + j \sin(\alpha + \varphi)] = U_{pa} - Z_k I_g \cos(\alpha + \varphi) - j Z_k I_g \sin(\alpha + \varphi)$$

Занемаривањем имагинарног члана, односно посматрањем пројекције напона  $U_{pb}$  на реалну осу добија се:

$$U_{pb} = |U_{pb}| = U_{pa} - Z_k I_g \cos(\alpha + \varphi)$$

из тога се добија израз за  $\Delta u$ :

$$\Delta U = |U_{pa}| - |U_{pb}| = U_{pa} - (U_{pa} - Z_k I_g \cos(\alpha + \varphi)) = Z_k I_g \cos(\alpha + \varphi)$$

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_n} = \frac{Z_k I_g}{U_n} \cos(\alpha + \varphi)$$

Уваживши раније наведене претпоставке:

3. Напон генератора једнак називном напону генератора и називном напону мреже, односно  $U_g = U_{ng} = U_n$ ,

4. Струја генератора једнака је називној струји генератора, односно  $I_g = I_{ng}$ ,

и коришћењем израза за привидну снагу генератора, добија се:

$$\Delta u = \frac{Z_k S_{ng}}{V_n^2} \cos(\alpha + \varphi)$$

једноставним тригонометриским трансформацијама претходног израза добија се:

$$\Delta u = \frac{S_{ng} (Z_k \cos(\alpha) \cos(\varphi) - Z_k \sin(\alpha) \sin(\varphi))}{V_n^2}$$

$$\Delta u = \frac{S_{ng} (R_k \cos(\varphi) - X_k \sin(\varphi))}{V_n^2}$$

Тако да поменута два израза која се могу наћи у литератури у ствари представљају два облика једног истог израза. Треба имати у виду раније наведено да угао "φ" може имати позитивну и негативну вредност у зависности од режима рада генератора па се последњи израз често даје у два облика у зависности од режима рада генератора:

$$\Delta u = \frac{S_{ng} (R_k \cos(|\varphi|) - X_k \sin(|\varphi|))}{V_n^2}$$

или

$$\Delta u = \frac{S_{ng} (R_k \cos(|\varphi|) + X_k \sin(|\varphi|))}{V_n^2}$$

Проблем који се јавља у случају коришћења претходног израза може се илустровати на следећем граничном идеализованом случају. Уколико се занемари отпорност мреже ( $R_k=0$ ) и уколико генератор ради са фактором снаге једнаким јединици ( $\cos\varphi=1$ ) тада претходни израз даје  $\Delta u=0$  за било коју вредност привидне снаге генератора ( $S_{ng}$ ). Тај резултат се може погрешно протумачити да се у таквом режиму и у таквој мрежи може прикључити генератор било које назначене снаге а да је  $\Delta u=0$ .

## ЗАКЉУЧАК

Израз:

$$\Delta u = k \frac{S_{ng}}{S_k}$$

дефинисан је у "Правилима о раду дистрибутивног система" и користи се за утврђивање промене напона на месту прикључења електране коју ствара генератор приликом укључуња или искључења, како у нашој тако и у другим земљама. Овај израз даје критичну вредност промене напона која неће угрозити рад постојећег ДСЕЕ без обзира на тип и начин рада (регулацију) генератора тако да се концепција и начин управљања дистрибутивним системом у великој мери задржавају. Имајући у виду да је електроенергетски систем деценијама развијан тако да се производња одвија у великим блоковима који су прикључени на преносни систем, а да дистрибутивни систем није предвиђен за прикључење производних јединица, употреба овог израза је добро решење. Једино остају отворена питања из ког разлога се овај израз односи на један генератор а не на целу електрану и из ког разлога је за промену напона утврђена вредност од 2%?

Израз:

$$\Delta u = \frac{Z_k S_{ng}}{V_n^2} \cos(\alpha + \varphi)$$

у датом облику или у другом облику се у појединим земљама користи за проверу промене напона коју ствара цела електрана или више електрана повезаних на део ДСЕЕ. У изразу фигурише фактор снаге електране ( $\cos\varphi$ ) што указује на чињеницу да оператор дистрибутивног система мора да води рачуна о начину рада електране, односно мора унапред да дефинише начин регулације електране. Предпоставља се да је овај израз уведен да би се, са једне стране, надоместило то што први наведен израз не третира целе електране већ само један генератор, а са друге стране ублажава услове прикључења електрана на дистрибутивни систем уводећи могућности регулације. Употреба овог израза се не препоручује због раније поменутог недостатка када се електрана прикључује на претежно индуктивну мрежу. Уместо њега за, исте

сврхе се препоручује примена израза:

$$\Delta u = 1 - \sqrt{1 - 2 \frac{Z_k S_{ng}}{V_n^2} \cos(\alpha + \varphi) + \left( \frac{Z_k S_{ng}}{V_n^2} \right)^2}$$

који тај недостатак нема.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Електровојводина д.о.о. Нови Сад, 2010, "Правила о раду дистрибутивног система", "сл.гл.РС. бр 8/2010"
2. ЈП ЕПС Дирекција за дистрибуцију електричне енергије Србије, 2011, "Техничка препорука бр. 16 Основни технички захтеви за прикључење малих електрана на дистрибутивни систем - II издање"
3. BDEW, 2008, "Tehhnical Guideline Generating Plants Connected to the Medium - Voltage Network"