

ПРИЛОГ 1 ТП-16:

**Примери прорачуна за оцену критеријума за
прикључење мале електране на мрежу ЕД**

Примери прорачуна за оцену критеријума за прикључење мале електране на мрежу ЕД

Пример 1:

Власник - инвеститор будуће мале хидроелектране (ХЕ) упутио је захтев за прикључење ХЕ на дистрибутивну НН мрежу, коју напаја дистрибутивни енергетски трансформатор (ЕТ) снаге $S_{TS} = 160 \text{ kVA}$. ХЕ би имала синхрони генератор инсталисане снаге $S_{ng} = 100 \text{ kVA}$. Дужина НН прикључка од места прикључења мале електране до места прикључења на НН мрежу износи 80 м.

- Да ли, и под којим условима, ова мала ХЕ може да се прикључи на НН мрежу ЕД?
- За типске вредности инсталисаних снага и напона кратких спојева дистрибутивних ЕТ-а који се користе у мрежи ЕД Србије, одредити највеће вредности јединичних снага генератора у малој електрани које могу да се прикључе на мрежу ЕД одговарајућег напонског нивоа, без штетног деловања на мрежу ЕД.

Решење:

а) Нема штетног деловања мале електране на мрежу ЕД ако је задовољен критеријум дозвољене снаге, којим се гарантује да при прикључењу генератора највеће јединичне снаге на мрежу ЕД, промена напона (напонски удар) у тачки прикључења на мрежу ЕД неће прекорачити 2%.

Критеријум дозвољене снаге је задовољен и **мала електрана може да се прикључи на мрежу ЕД** ако је испуњен услов:

$$S_{ngm} \leq \frac{S_{ks}}{50 \cdot k} \dots\dots\dots (1)$$

где је:

- S_{ngm} - највећа вредност јединичне снаге генератора у малој електрани, односно укупна снага више генератора ако се једновремено прикључују на мрежу ЕД, у [MVA];
- S_{ks} - снага трофазног кратког споја (стварна вредност на месту прикључења на мрежу ЕД), у [MVA];
- k - количник струје укључења и назначене струје генератора, и има вредности дате у тачки 5.4 ТП-16.

На снагу кратког споја S_{ks} на ниженапонским сабирницама у некој ТС доминантан утицај има реактанса кратког споја ЕТ-а, док се утицај примарне мреже у практичним прорачунима дистрибутивних мрежа обично занемарује. Тако израз (1) можемо даље да претставимо као:

$$S_{ngm} \leq \frac{S_{ks}}{50 \cdot k} = \frac{110 \cdot S_{TS}}{u_k} \cdot \frac{1}{50 \cdot k} = \frac{2,2}{k} \cdot \frac{S_{TS}}{u_k} \dots\dots\dots (2)$$

где је:

S_{TS} - типска вредност инсталисане снаге дистрибутивног ЕТ-а у ТС која напаја мрежу ЕД на коју се прикључује мала електрана, у [MVA];

u_k [%] - напон кратког споја ЕТ-а у ТС на коју се прикључује мала електрана.

У конкретном примеру је реч о малој ХЕ са једним генератором, па параметри за прорачун износе:

- а) **синхрони генератор**: снага $S_{ng} = 100$ kVA, $k = 1$;
- б) **дистрибутивни ЕТ** 10/0,42 kV: снага $S_{TS} = 160$ kVA, напон кратког споја $u_k = 4\%$,

па из израза (2) добијамо највећу дозвољену вредност снаге генератора у малој ХЕ која може да се прикључи на сабирнице НН у ТС 10/0,4 kV:

$$S_{ngm} \leq \frac{2,2 \cdot S_{TS}}{k \cdot u_k} = \frac{2,2 \cdot 160}{1 \cdot 4} \leq 88 \text{ kVA} < S_{ng},$$

што је мање од тражене (пријављене) снаге мале ХЕ од $S_{ng} = 100$ kVA.

Према томе, **мала ХЕ инсталисане снаге 100 kVA не може да се прикључи на ЕТ снаге 160 kVA**. Решење може да се нађе тако што би се претходно заменио дистрибутивни ЕТ и уградио ЕТ инсталисане снаге 250 kVA, и тада по истом поступку, или уз помоћ табеле Пр.1, добијамо да највећа дозвољена вредност снаге мале ХЕ која може да се прикључи на ЕТ снаге 250 kVA износи: $S_{ngm} = 125$ kVA.

б) Са изузетком ТС X/0,4 kV, у осталим дистрибутивним трансформаторским станицама се користе по два ЕТ-а у коначној етапи изградње. Међутим, уобичајено је да у нормалном погону ови ЕТ-и не раде паралелно, па је за оцену критеријума дозвољене снаге меродаван погон са једним ЕТ-ом (строжији захтев).

За вредности инсталисаних снага S_{TS} у нормалном погону и типских вредности напона кратких спојева $u_k\%$ ЕТ-а који се користе у мрежи ЕД Србије, у табели Пр.1 су на основу израза (2) прорачунате **вредности дозвољених јединичних снага малих електрана које задовољавају по критеријуму дозвољене снаге**.

За $k = 10$ се из израза (1) добија укупна снага свих генератора у малој електрани $S_{MEL} = \sum S_{ng}$ која може да се прикључи на мрежу ЕД без штетног деловања:

$$S_{MEL} = \sum S_{ng} \leq \frac{S_{ks}}{500}$$

Мале електране које испуњавају овај услов могу да се прикључе на мрежу ЕД без обавеза доказивања критеријума фликера (тачка 5.5) и критеријума виших хармоника (тачка 5.6).

Табела Пр.1: Дозвољене снаге малих електрана за прикључење на мрежу ЕД - критеријум дозвољене снаге

Параметри ↓		Однос трансформације у дистрибутивној ТС на коју се директно прикључује мала електрана				
		X/0,42	35/10,5	110/36,75		110/21и 110/10,5
u _k [%]		4	7	11		14
S _{TS} [MVA]		0,25	8	31,5	63	31,5
S _{ngm} [MVA]	SG	0,125	2,5	6,3	12,6	5
	AG	0,06	1,2 *	-		
	k = 8	-	0,3	0,8	1,6	0,6
Σ S _{ng} [MVA]	k = 10**	-	0,25	0,67	1,34	0,5

u_k [%] - напон кратког споја ЕТ-а на који се прикључује мала електрана;
 S_{TS} [MVA] - типична вредност инсталисане снаге дистрибутивног ЕТ-а;
 S_{ngm} [MVA] - дозвољена вредност јединичне снаге генератора мале електране;
 Σ S_{ng} [MVA] - дозвољена вредност укупне инсталисане снаге мале електране;
 SG; AG - синхрони генератор; асинхрони генератор;
 k = 8 - непозната вредност струје укључења генератора;
 * - конструкција генератора омогућује примену снаге до око 0,25 MVA;
 ** - задовољен услов: $S_{MEL} = \sum S_{ng} \leq \frac{S_{ks}}{500}$

Пример 2:

Одредити услове за прикључење електране на ветар на дистрибутивну мрежу 10 kV која се напаја из ТС 35/10 kV инсталисане снаге $S_{t35} = 8 \text{ MVA}$. Место прикључења мале електране на мрежу ЕД су сабирнице 10 kV у дистрибутивној ТС 10/0,4 kV, која се напаја из ТС 35/10 kV надземним водом ЗхАI/Ѓ 70/12 дужине $l_v = 1,8 \text{ km}$ (сл.Пр.2).

У електрани се користи један синхрони генератор са исправљачем, међуколом једносмерне струје и претварачем, назначене снаге $S_{ng} = 400 \text{ kVA}$, назначеног напона $U_{ng} = 0,42 \text{ kV}$.

За повезивање генератора са мрежом 10 kV у малој електрани се користи енергетски трансформатор 0,42/10 kV, снаге 400 kVA.

Подносилац захтева за прикључење је приложио и следеће податке:

Коефицијент фликера дугог трајања: $c_f = 32$;

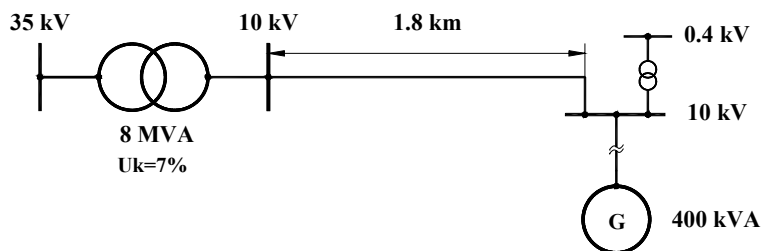
Струје виших хармоника: $I_{vh5} = 4,2\% \cdot I_n$; $I_{vh11} = 4,1\% \cdot I_n$; $I_{vh13} = 4,1\% \cdot I_n$; $I_{vh23} = 3,6\% \cdot I_n$; $I_{vh25} = 2,8\% \cdot I_n$, где је I_n назначена вредност струје генератора (претварача) снаге 400 kVA у малој електрани.

Решење:

Код електране на ветар треба да проверимо прва три критеријума из тачке 5.3. Провера четвртог критеријума - утицај мале електране на повећање снаге кратког споја у мрежи ЕД није потребна јер је снага мале електране мања од 1 MVA, док се опрема на страни 10 kV у дистрибутивној ТС 10/0,4 kV димензионише за снагу кратког споја од 250 MVA.

а) Критеријум дозвољене снаге мале електране оцењујемо према методи из примера 1. Из табеле Пр.1 се види да је овај критеријум задовољен за електрану на ветар снаге 400 kVA ако се прикључак изведе директно на сабирнице 10 kV у ТС 35/10 kV, јер највећа вредност дозвољене снаге мале електране износи 2,4 MVA. Ова вредност је добијена под претпоставком да је: $k = 1$, јер је реч о синхронном генератору са инвертором.

Међутим, тачка напајања мреже ЕД се налази на сабирницама 10 kV у ТС 10/0,4 kV (сл.Пр.2), па је за даље прорачуне меродавна стварна вредност снаге кратког споја S_{ks10} на тим сабирницама.



Сл.Пр.2: Прорачун стварне струје кратког споја

Снагу трофазног кратког споја S_{ks10} на сабирницама 10 kV у ТС 10/0,4 kV израчунаћемо помоћу израза:

$$S_{ks10} = \frac{110}{X_{e10}} \dots\dots\dots (3)$$

где је X_{e10} еквивалентна реактанса кратког споја сведена на сабирнице 10 kV у ТС 10/0,4 kV, и износи:

$$X_{e10} = X_{t35} + X_{v10} \dots\dots\dots (4)$$

где је X_{t35} реактансе кратког споја ЕТ-а 35/10,5 kV, а X_{v10} реактансе кратког споја вода 10 kV између ТС 35/10 kV и ТС 10/0,4 kV.

Напон кратког споја ЕТ-а 35/10,5 kV снаге $S_{t35} = 8$ MVA износи $u_k = 7\%$, а реактанса вода 10 kV: $x_{v10} \approx 0,38 \Omega/\text{km}$, па реактансе кратких спојева износи:

$$X_{t35} = \frac{u_k}{S_{t35}} = \frac{7}{8} = 0,875 \Omega; X_{v10} = \frac{x_{v10} \cdot l_v}{U_n^2} \cdot 100 = \frac{0,38 \cdot 1,8}{10^2} \cdot 100 = 0,684 \Omega.$$

Снага трофазног кратког споја на сабирницама 10 kV у ТС 10/0,4 kV износи:

$$S_{ks10} = \frac{110}{X_{e10}} = \frac{110}{X_{t35} + X_{v10}} = \frac{110}{0,875 + 0,684} \approx 70 \text{ MVA}.$$

Ова снага је меродавна за проверу сва три критеријума.

Критеријум дозвољене снаге је задовољен према изразу (1) ако снага генератора S_{ngm} мале електране износи:

$$S_{ngm} \leq \frac{S_{ks10}}{50 \cdot k} = \frac{70}{50 \cdot 1} \approx 1,4 \text{ MVA} > S_{ng}.$$

Према томе, с обзиром на критеријум дозвољене снаге, електрана на ветар инсталисане снаге: $S_{ng} = 400$ kVA неће имати штетно деловање на мрежу ЕД и може да се прикључи на мрежу 10 kV у ТС 10/0,4 kV.

б) Критеријум фликера је задовољен ако фактор сметњи A_{fs} мале електране изазваних фликером дугог трајања има вредност: $A_{fs} \leq 0,1$.

Мала електрана може да се прикључи на мрежу ЕД ако је испуњен услов (Л.1):

$$A_{fs} = \left(c_{fMEL} \cdot \frac{S_{MEL}}{S_{ks}} \right)^3 \leq 0,1 \dots\dots\dots (5)$$

где је:

- S_{MEL} - укупна инсталисана снага мале електране, у [MVA];
- S_{ks} - снага трофазног кратког споја (стварна вредност) на месту прикључења на мрежу ЕД, у [MVA];
- c_{fMEL} - коефицијент фликера мале електране.

Ако мала електрана има "n" генератора различитих карактеристика, између коефицијента фликера мале електране c_{fMEL} и коефицијената фликера c_{fi} појединачно по генераторима важи однос:

$$c_{fMEL} = \frac{\sqrt{\sum_i (c_{fi} \cdot S_{ngi})^2}}{\sum_i S_{ngi}} \dots\dots\dots (6)$$

где је:

- S_{ngi} - снага i - тог генератора у малој електрани, у [MVA];
- c_{fi} - коефицијент фликера i - тог генератора у малој електрани.

Ако мала електрана има "n" генератора истих карактеристика, што је најчешћи случај, тада је: $S_{MEL} = n \cdot S_{ng}$, па изрази (6) и (5) постају:

$$c_{fMEL} = \frac{c_{f1}}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots (7)$$

$$A_{fs} = \left(\frac{c_{f1}}{\sqrt{n}} \cdot \frac{n \cdot S_{ng1}}{S_{ks}} \right)^3 \leq 0,1 \dots\dots\dots (8)$$

где је:

- S_{ng1} - снага једног од "n" генератора у малој електрани, у [MVA];
- c_{f1} - коефицијент фликера једног од "n" генератора у малој електрани.

Из израза (7) се види да се **код малих електрана са већим бројем генератора, коефицијент фликера мале електране као целине смањује** према коефицијенту фликера једног генератора у односу: c_{f1} / \sqrt{n} .

На пример: ако у малој електрани има $n = 3$ генератора од којих сваки има коефицијент фликера $c_{f1} = 32$, коефицијент фликера мале електране као целине ће се смањити на вредност: $c_{fMEL} = 18,5$ (пригушење фликера), а то значи да се вредност дозвољене инсталисане снаге мале електране која може да се прикључи на мрежу ЕД увећава за 73% у односу на вредност инсталисане снаге мале електране са једним генератором.

Из израза (8) може да се добије **вредност највеће дозвољене јединичне снаге једног генератора S_{ngm} , односно укупне инсталисане снаге $S_{MEL} = n \cdot S_{ng1}$ у малој електрани, која с обзиром на критеријум фликера дугог трајања може да се прикључи на мрежу ЕД:**

$$S_{MEL} = \frac{0,464}{c_{f1}} \cdot \sqrt{n} \cdot S_{ks} \dots\dots\dots (9)$$

$$S_{ngm} = \frac{0,464}{c_{f1}} \cdot \frac{\sqrt{n}}{n} \cdot S_{ks} \dots\dots\dots (10)$$

У нашем примеру је: $n = 1$, $c_{f1} = 32$ и $S_{ks10} = 70$ MVA, па из израза (10) добијамо:

$$S_{ngm} = \frac{0,464}{c_{f1}} \cdot \frac{\sqrt{n}}{n} \cdot S_{ks10} = \frac{0,464}{32} \cdot 1 \cdot 70 \approx 1 \text{ MVA} > S_{ng},$$

што значи да је дозвољена снага мале електране на ветар већа од стварне снаге, и у овом конкретном случају **мала електрана неће**

производити фликере штетне по мрежу ЕД, па с обзиром на овај критеријум може да се прикључи на сабирнице 10 kV у ТС 10/0,4 kV.

Ако се упореде критеријуми дозвољене снаге и фликера, изрази (1) и (10), добија се у којем случају је критеријум снаге строжији од критеријума фликера дугог трајања у режиму рада мале електране са једним генератором:

$$50 \cdot k = \frac{c_f}{0,464} \therefore c_f > 23 \cdot k.$$

Код синхроних генератора и инвертора је $k = 1$, па добијамо да је критеријум снаге строжији од критеријума фликера ако је вредност коефицијента фликера: $c_f > 23$. Ако је $k \geq 2$ (асинхрони генератори или случајеви када нема података о коефицијенту k), тада је $c_f > 46$.

Како је и код електране на ветар: $c_f \leq 40$, долазимо до општег закључка: **увек је строжији критеријум снаге**

- ако је $k \geq 2$ и/или
- ако у малој електрани има више генератора.

Ако, као у примеру 1, снагу трофазног кратког споја S_{ks} на ниженапонским сабирницама у ТС претставимо преко реактансе кратког споја X_e ЕТ-а, израз (10) можемо за $n = 1$ да претставимо као:

$$S_{ngm} = \frac{0,464}{c_f} \cdot \frac{110 \cdot S_{TS}}{U_k} \leq \frac{51,06}{c_f} \cdot \frac{S_{TS}}{U_k} \dots\dots\dots(11)$$

У табели Пр.2 су на основу израза (11) дате **вредности дозвољених јединичних снага једног генератора S_{ngm} у малој електрани, која с обзиром на критеријум фликера дугог трајања може да се прикључи на мрежу ЕД**, и то у режиму рада мала електране са једним генератором (најтежи случај).

Види се да и при $c_{fl} = 40$, на СН дистрибутивну мрежу Србије могу да се прикључују електране на ветар релативно великих вредности инсталираних снага, али због чињенице да са овом врстом електрана немамо никакво искуство у Србији, прорачунате вредности морају да буду оверене мерењем на конкретним реализованим конструкцијама, односно потврђене одговарајућим атестом овлашћене независне институције.

Табела Пр.2: Дозвољене снаге мале електране за прикључење на мрежу ЕД - критеријум фликера

Параметри ↓		Однос трансформације у дистрибутивној ТС на коју се директно прикључује мала електрана				
		X/0,42	35/10,5	110/36,75		110/21и 110/10,5
u_k [%]		4	7	11		14
S_{TS} [MVA]		0,4	8	31,5	63	31,5
S_{ngm} [MVA]	$c_{fl} = 20$	0,25	2,9	7,3	14,6	2,6
	$c_{fl} = 30$	0,17	1,9	4,9	9,8	1,7
	$c_{fl} = 40$	0,13	1,5	3,7	6,4	1,3

u_k [%] - напон кратког споја ЕТ-а на који се прикључује мала електрана;
 S_{TS} [MVA] - типична вредност инсталисане снаге дистрибутивног ЕТ-а;
 S_{ngm} [MVA] - дозвољена вредност инсталисане снаге једног генератора;
 c_{f1} - коефицијент фликера једног генератора.

в) Критеријум виших хармоника

Критеријум дозвољених струја виших хармоника се проверава помоћу израза:

$$I_{vhdoz} = I_{vhs} \cdot S_{ks}$$

где је:

- I_{vhdoz} - дозвољена вредност струје вишег хармоника на напону генератора, у нашем примеру: $U_{ng} = 0,42$ kV, у [A];
- S_{ks} - снага трофазног кратког споја (стварна вредност) на месту прикључења на мрежу ЕД, у нашем примеру: $S_{ks10} = 70$ MVA;
- I_{vhs} - вредност струје вишег хармоника која је сведена на снагу кратког споја на месту прикључења на мрежу ЕД, у [A / MVA].

У табели Пр.2.6 дати су резултати прорачуна вредности струја виших хармоника које не смеју да се прекораче на месту прикључења на мрежу ЕД. У нашем примеру се види да је на сабирницама 10 kV у ТС 10/0,4 kV дозвољена вредност струје за 23.-и и 25.-и хармоник:

$$I_{vhdoz23} = I_{vhs} \cdot S_{ks10} = 0,2 \cdot 70 = 14 \text{ A} \text{ и } I_{vhdoz25} = 14 \text{ A},$$

док конкретна електрана на ветар ствара струју 23.-ег хармоника:

$$I_{vh23} = I_{vh\%} \cdot I_{ng} = 3,6 \cdot \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 0,42} = 19,8 \text{ A},$$

односно 25.-ог хармоника: $I_{vh25} = 15,4 \text{ A}$.

Табела Пр.2.6: Струје виших хармоника мале електране на ветар

$S_{ks10} = 70 \text{ MVA}$	$S_{ng} = 400 \text{ kVA}; U_{ng} = 0,4 \text{ kV}; I_{ng} = 551 \text{ A}$							
Редни број вишег хармоника [v]	5	7	11	13	17	19	23	25
I_{vhs} [A / MVA]	0,7	0,6	0,5	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
I_{vhdoz} [A]	49	42	35	21	21	14	14	14
$I_{vh\%}$ [% · I_{ng}]	4,2		4,1	4,1			3,6	2,8
I_{vh} [A]	23,1		22,6	22,6			19,8	15,4
I_{vhs} [A / MVA] - сведена вредност струје вишег хармоника; I_{vhdoz} [A] - дозвољена вредност струје вишег хармоника; $I_{vh\%}$ [% · I_{ng}] - процентуална вредност струје v-тог реда вишег хармоника; I_{vh} [A] - вредност струје v-тог реда вишег хармоника мале електране.								

Према томе, **мала електрана на ветар не задовољава критеријум виших хармоника** и под таквим условима јој се не би издала сагласност за прикључење на сабирнице 10 kV у ТС 10/0,4 kV. **Решење насталог**

проблема захтева посебну техноекономску анализу, а долази у обзир примена једног, или комбинација више од следећих решења:

- а) Прикључни вод 10 kV мале електране, уместо у ТС 10/0,4 kV, продужити до ТС 35/10 kV снаге 8 MVA. Снага трофазног кратког споја на сабирницама 10 kV у ТС 35/10 kV износи тада:

$$S_{ks10} = \frac{110}{X_{e10}} = \frac{110}{X_{t35}} = \frac{110}{0,875} \approx 125 \text{ MVA.}$$

$$\text{Сада је: } I_{vhdoz23} = I_{vhs} \cdot S_{ks10} = 0,2 \cdot 125 = 25 \text{ A} > 19,8 \text{ A.}$$

- б) Власник мале електране прилаже посебан прорачун (атест) независне овлашћене институције да у конкретном случају мала електрана неће имати штетно деловање на мрежу ЕД, с обзиром на очекиване вредности струја и/или напона виших хармоника. После завршетка изградње мале електране мерењем мора да се докаже да стварне вредности струја и/или напона виших хармоника не прелазе очекиване вредности из прорачуна (атеста).
- г) Власник мале електране прилаже доказ да је уградио филтре за одговарајуће редове виших хармоника (у нашем примеру: за $\nu = 23$ и $\nu = 25$, којима је њихове вредности свео на безопасну меру.

Литература:

- 1 *Tehnische Richtlinie: "Parallelbetrieb von Eigenerzeugungsanlagen mit dem Mittelspannungsnetz des Elektrizitätsversorgungsunternehmens (EVU)", Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke - VDEW, 1994. god.*
- 2 *N. Jenkins at al.: "Embedded Generation" (IEE Power and Energy Series 31, London 2000).*
- 3 *"Збирка техничких препорука ЕД Србије" (септембар 2001.).*