

Практикум из елемената електроенергетских система

Вежба: Промена преносног капацитета вода у ветровитим регионима

1. Теоријски увод

Повећање броја становника као и повећан привредни раст сваке земље праћен је и повећањем потреба за електричном енергијом. Да би успешно одговорила на тренд повећања потрошње, свака земља мора имати јасно дефинисану стратегију развоја свог електроенергетског система чији је задатак да у сваком тренутку поуздано врши снабдевање крајњих потрошача неопходном електричном енергијом. Поред повећања потрошње, у свету је присутан и пораст производње из обновљивих извора енергије. Разлози за то су углавном еколошке природе, као и смањење енергетске зависности од фосилних горива чије резерве су ограничене.

Електроенергетски систем (ЕЕС) може се поделити на четири велике целине: производња, пренос, дистрибуција и потрошња електричне енергије. У конвенционалном ЕЕС-у ток енергије је јасно дефинисан – енергија се најчешће производи у великим централизованим јединицама након чега се помоћу преносне и дистрибутивне мреже преноси до крајњих потрошача. Како се дијаграми потрошње слабо мењају у кратким временским интервалима, конвенционалним системом није тешко управљати. Са појавом интермитентних обновљивих извора енергије ситуација се драстично мења. Производња из обновљивих извора зависи од тренутних расположивих ресурса и значајно се може мењати у току дана. Са друге стране, обновљиви извори енергије су углавном јако дисперзовани у систему, те се њиховом појавом услед велике производње могу променити и смерови токова снага у преносној и дистрибутивној мрежи. Са друге стране, интеграција обновљивих извора енергије у ЕЕС довела је и до развоја паметних мрежа и принципа управљања потрошњом. Управљање потрошњом има другачију логику управљања системом у односу на конвенционални ЕЕС – док се у конвенционалном ЕЕС-у снага производње прилагођава захтевима потрошњом, помоћу управљања потрошњом могуће је снагу потрошње прилагодити производњи, пре свега обновљивим изворима енергије чија максимална производња зависи од тренутних расположивих ресурса.

Преносна и дистрибутивна мрежа имају задатак да врше пренос енергије до крајњих потрошача. Повећање потрошње, али и производње из обновљивих извора, доводи до све већег динамичког оптерећивања водова. Сваки вод, било то надземни или кабловски, има ограничен преносни капацитет који је најчешће диктиран максималном дозвољеном температуром. Повећање температуре вода настаје услед Џулових губитака. Енергија губитака се једним делом троши на повећање температуре вода, а са друге стране део те енергије се одводи хлађењем вода. Одавде се може написати основна једначина термичке равнотеже посматраног вода:

$$dQ_g = dQ_a + dQ_h \quad (1)$$

У овој једначини, dQ_g представља снагу Џулових губитака на далеководу, dQ_a енергију која се троши на загревање вода и dQ_h енергију која се одводи услед хлађења вода. Једначина (1) може се написати и у следећем облику:

$$R(\Theta)i^2 dt = mcd\Theta + k_H S\Theta dt \quad (2)$$

У овој једначини, R предстаља подужну отпорност вода при некој температури, i тренутну вредност струје која протиче кроз проводник, m подужну масу проводника, c специфичну топлотну капацитивност вода, Θ пораст температуре у односу на амбијенталну, k_H коефицијент одвођења топлоте са површине проводника и S подужну површину проводника. Обзиром да кроз вод пролази струја фреквенције 50 Hz, може се претпоставити да су промене струје занемарљиве у односу на временску константу грејања проводника, па уместо тренутне вредности струје може се посматрати њена ефективна вредност. Ако се претпостави да се и отпорност не мења са променом температуре, ова диференцијална једначина може се приказати у следећем облику:

$$\frac{mc}{k_H S} \cdot \frac{d\Theta}{dt} + \Theta = \frac{RI^2}{k_H S} \quad (3)$$

$$T \cdot \frac{d\Theta}{dt} + \Theta = \Theta_{gr} \quad (4)$$

Решење ове диференцијале једначине приказано је у једначини (5):

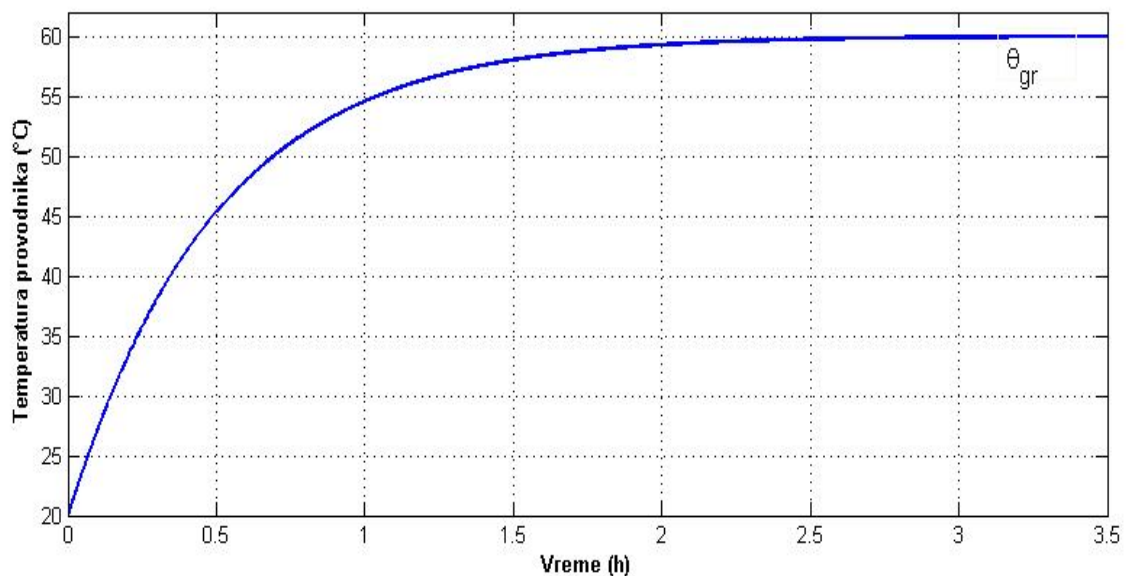
$$\Theta = \Theta_{gr} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (5)$$

У једначини (5), $T = \frac{mc}{k_H S}$ представља временску константу загревања проводника, док

је $\Theta_{gr} = \frac{RI^2}{k_H S}$ гранична температура коју проводник достиже у устаљеном стању. На

Сл. 1 приказан је график загревања проводника у функцији од протеклог времена.

Сл. 1. Загревање проводника при протицању струје I_1



Са Сл. 1 се види да се температура проводника може приказати експоненцијалном функцијом, при чему у устаљеном стању достиже температуру $\Theta_{gr} = \frac{RI^2}{k_H S}$. Када би се

струја кроз проводник повећала на неку вредност I_2 која је већа од I_1 , добила би се нова устаљена вредност температуре. Промена температуре проводника тада се може описати једначином (6):

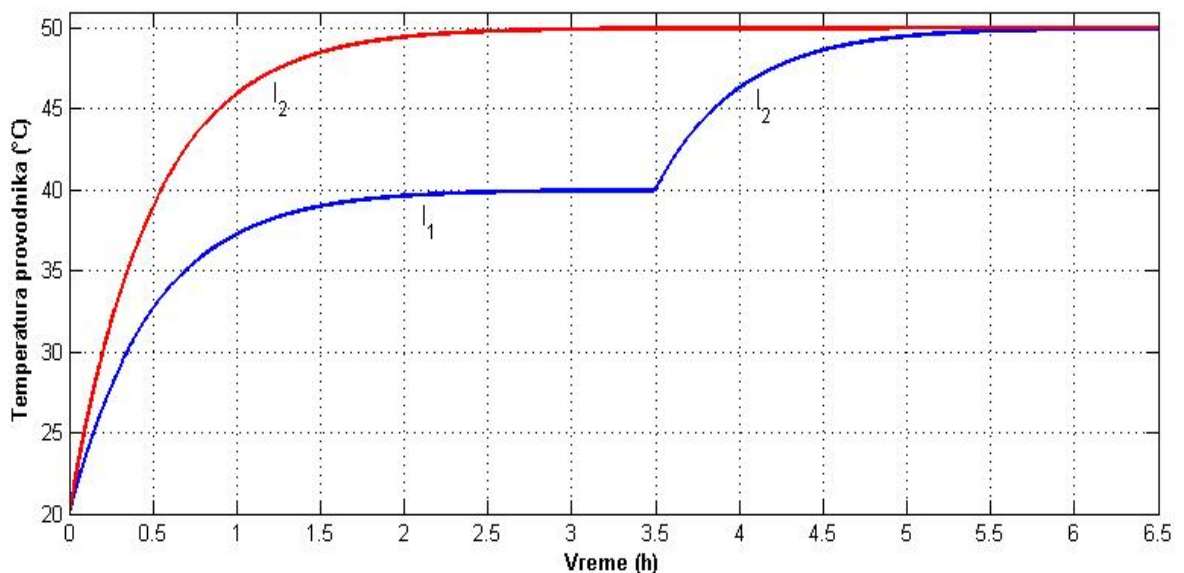
$$\Theta = \Theta_0 + (\Theta_{gr} - \Theta_0) \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (6)$$

У овој једначини, почетна температура одговара устаљеном стању приликом протицања струје I_1 и њена вредност износи $\Theta_0 = \frac{RI_1^2}{k_H S}$. У другом случају, када кроз

проводник протиче струја I_2 , температура у устаљеном стању износи $\Theta_{gr} = \frac{RI_2^2}{k_H S}$. На

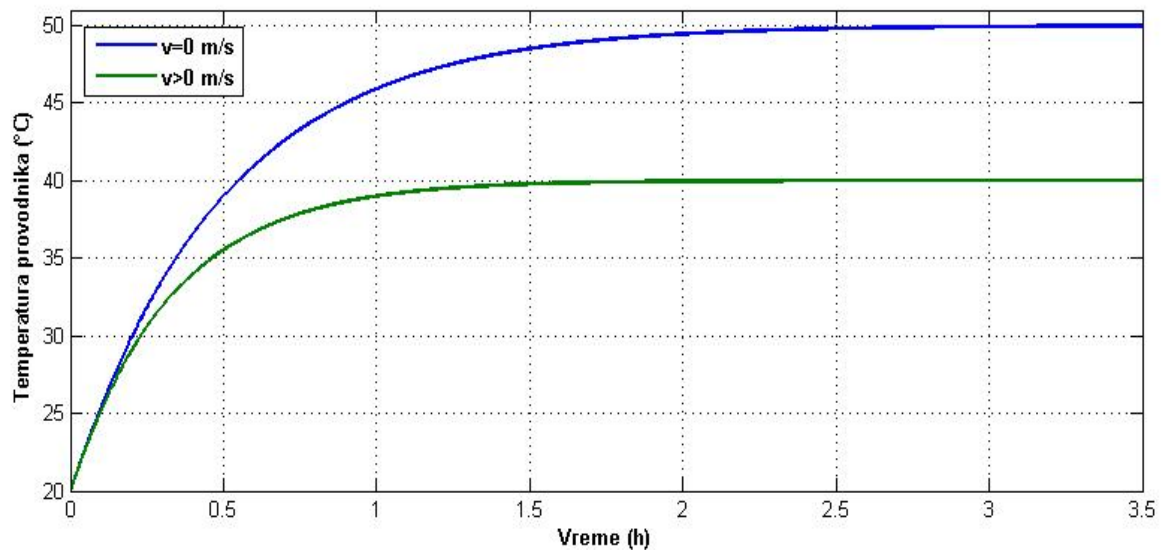
Сл. 2 приказани су графици загревања проводника када кроз њега протиче струја прво струја I_1 па I_2 и када кроз њега одмах протиче струја I_2 .

Са слике се може видети да проводник у оба случаја достиже исту граничну температуру, тј. да гранична температура не зависи од начина сагревања проводника већ само од струје која протиче кроз њега. То се може видети и из формуле за израчунавање граничне температуре.



Сл. 2. Загревање проводника при протицању струја I_1 и I_2

У случају када се проводник налази у ветровитом подручју, приликом дувања ветра доћи ће до побољшаних услова хлађења проводника. У том случају, коефицијент одвођења топлоте са површине проводника k_H ће се повећати, што значи да ће се смањити гранична температура проводника, али и временска константа загревања што значи да ће се проводник брже загрејати. На Сл. 3 приказан је пример дијаграма загревања проводника када у његовој околини нема ветра, и када дува ветар, при чему струја проводника остаје константна.



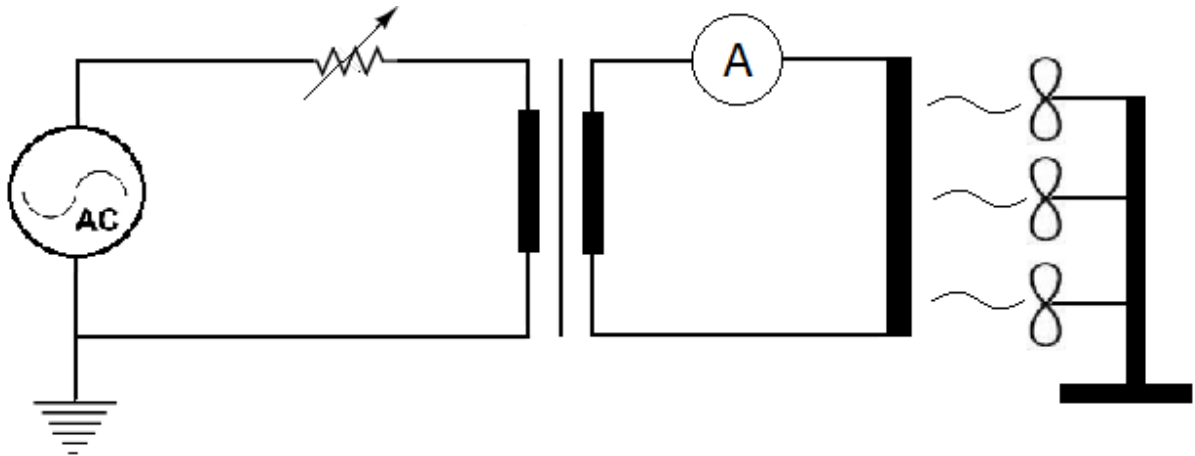
Сл. 3. Загревање проводника када дува ветар и када не дува ветар

Са Сл. 3 се види да се гранична температура проводника смањује када ветар дува. Како се преносна моћ проводника дефинише његовом максимално дозвољеном температуром, може се закључити да када постоји хлађење помоћу ветра да се проводник додатно може оптеретити.

Напомена: У претходним релацијама је претпостављено да се отпорност проводника не мења са променом температуре.

2. Циљ мерења, коришћена апаратура и шема веза

Циљ мерења у овој вежби је снимање утицаја дувања ветра на хлађење проводника, као и на промену његове струјне оптеретљивости. Шема веза приказана је на Сл. 4.



Сл. 4. Шема веза

У вежби се користе следећи елементи.

1. Аутотрансформатор
2. Алуминијумски проводник попречног пресека 70mm^2
3. Амперметар
4. Уређај за мерење температуре
5. Три вентилатора

Апаратура која се користи за извођење вежбе приказана је на Сл.5,6 и 7, са означеним редним бројевима претходно побројаних елемената.



Сл. 5. Шема веза



Сл. 6. Вентилатори којима се проводник форсирано хлади



Сл. 7. Мултиметар којим се мери температура проводника

3. Задатак

Измерити амбијенталну темепературу. Помоћу аутотрансформатора подесити дефинисану вредност трајно дозвољене струје кроз проводник и снимити криву загревања проводника (резултате мерења уписати у табелу и прираштај температуре скицирати на милиметарском папиру који је приложен уз упутство).

Амбијентална температура (ϑ_a): 20°C

Трајно дозвољена струја (I_{td}): 150 A

Резултати мерења темепературе проводника без ветра приказани су у Табели 1.

Табела 1

t (s)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	90	120	150
ϑ (°C)	20.3	20.6	21.8	22.2	22.7	23.1	23.5	24	24.3	24.8	25.3	25.7	26	28.4	30.5
t (s)	180	210	240	270	300	360	420	480	540	600	660	720	780	840	900
ϑ (°C)	32.8	34.8	36.9	38.7	40.6	42.4	45.3	47.8	49.5	50.9	52.5	53.5	54.5	55.5	56.6
t (s)	960	1020	1080	1140	1200	1260	1320	1380	1440	1500					
ϑ (°C)	58	58.5	59	59.7	60.5	61	61.3	61.5	61.7	61.7					

Температура у устаљеном стању (ϑ_{gr1}): 61.7°C

Након 25 минута од почетка мерења, укључити све вентилаторе којима се симулира дување ветра. Снимити криву хлађења проводника (скицирати на истом графику и надовезати криву хлађења на претходно нацртану линију загревања).

Резултати мерења температуре проводника са ветром, при истој струји као у првом случају, I_{td} :

Табела 2

t (s)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	90	120	150
ϑ(°C)	60.4	57.8	55.2	54	52.6	51.1	49.7	48.1	47	46	45.1	44.1	39.1	36.6	34.0
t (s)	180	210	240	270	300	360	420	480	540	600	660	720	780	840	900
ϑ (°C)	32.6	31.2	30.4	29.8	29.3	28.9	28.5	28.4	28.1	28.2	28.3	28	27.7	27.6	27.6

Нова гранична температура проводника (ϑ_{gr2}) 27.6°C

Потребно је извести израз за прорачун нове трајно дозвољене струје, I_{tdv} која ће загрејати проводник на исту температуру уз дување вентилатора као и првобитна струја, I_{td} , без дувања вентилатора.

$\Theta_1 = \frac{I_{td}^2 R}{k_{H_1} S} = \vartheta_{gr1} - \vartheta_a$, прираштај температуре проводника, у условима природног хлађења, са протицањем струје I_{td}

$\Theta_2 = \frac{R I_{td}^2}{k_{H_2} S} = \vartheta_{gr2} - \vartheta_a$, прираштај температуре проводника, у условима форсираног хлађења, са протицањем струје I_{td}

Нова трајно дозвољена струја ће загрејати проводник на температуру ϑ_{gr1} , са укљученим вентилаторима, односно при константи хлађења $k_{H_2} > k_{H_1}$.

$$\Theta_1 = \frac{I_{tdv}^2 R}{k_{H_2} S} = \vartheta_{gr1} - \vartheta_a$$

$$\frac{\Theta_1}{\Theta_2} = \frac{I_{tdv}^2}{I_{td}^2} \rightarrow I_{tdv} = I_{td} \sqrt{\frac{\Theta_2}{\Theta_1}} = I_{td} \sqrt{\frac{\vartheta_{gr2} - \vartheta_a}{\vartheta_{gr1} - \vartheta_a}}$$

На основу претходно спроведених мерења, добија се да је нова трајно дозвољена струја, при побољшаним условима хлађења:

$$I_{tdv} = 150 \sqrt{\frac{61.7 - 20}{27.6 - 20}} = 351^\circ\text{C} \approx 350^\circ\text{C}$$

Резултати мерења температуре проводника са ветром при новој израчунатој трајно дозвољеној струји, I_{tdv} , приказани су у Табели 3.

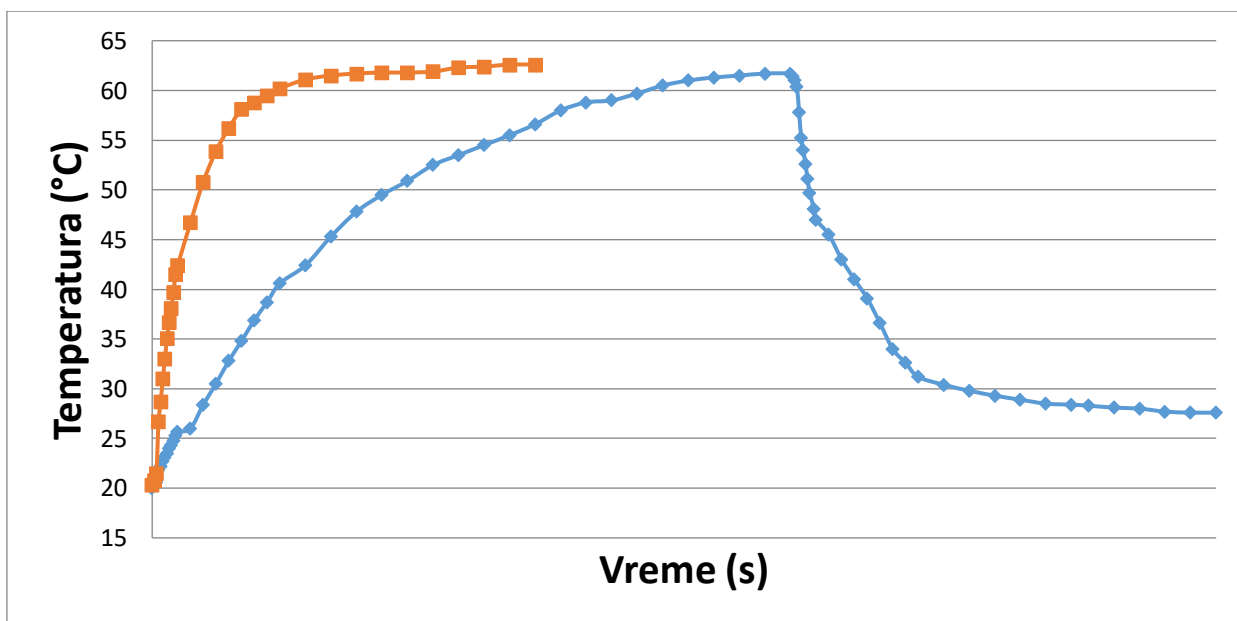
Табела 3

t (s)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	90	120	150
θ(°C)	20.8	21.5	26.7	28.7	31	33	35.1	36.7	38.1	39.7	41.5	42.4	46.7	50.8	53.9
t (s)	180	210	240	270	300	360	420	480	540	600	660	720	780	840	900
θ (°C)	56.2	58.1	58.8	59.5	60.2	61.1	61.5	61.7	61.8	61.8	61.8	61.9	62.3	62.4	62.6
t (s)	960														
θ (°C)	62.6														

Прорачуната нова трајно дозвољена струја (I_{tdv})_350 A_

Процентуално повећање преносног капацитета вода са ветром: __233%__

Графички приказ измерених температура проводника приказан је на следећој слици. Плавом бојом је представљена промена температуре проводника са струјом I_{td} (Табеле 1 и 2), а црвеном промена температуре проводника са струјом I_{tdv} (Табела 3). На графику се такође може уочити да се устаљена температура проводника успоставља брже онда када су условима хлађења бољи. Временска константа T која дефинише динамику промене температуре зависи од коефицијента одвођења топлоте. У случају фосираног хлађења, овај коефицијент је већи, па је временска константа већа, а трајање прелазног процеса краће.



Основни закључак ове вежбе је да ветар, који обезбеђује побољшане услове хлађења проводника надземног вода омогућава да проводник оптеретимо већом струјом од стандардима дефинисане трајно дозвољене вредности. Ово дозвољено преоптерећење се мења са метеоролошким условима, тј. мења се током године и дуж далековода. На далеководу велике дужине, који пролази кроз пределе са различитим климатским условима, најкритичнија је она деоница која ће се највише загревати, тј. која пролази кроз окружење у коме су услови хлађења најлошији.

Овим приступом, може се повећати ефикасност система са постојећим ресурсима, без инвестирања у градњу нових или реконструкцију постојећих далековода.