




## Estimacija dinamičke termičke margine rotora hidrogeneratora

Ilija Klasnić<sup>1,2</sup>, Dragan Belonić<sup>3</sup>, Žarko Janda<sup>1,2</sup>,  
Jasna Dragosavac<sup>1,2</sup>, Zoran Ćirić<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Bul. kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija

<sup>2</sup> Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut Nikola Tesla Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, Srbija

<sup>3</sup> Elektroprivreda Srbije, Ogranak HE Đerdap, Trg kralja Petra br. 1, 19320 Kladovo, Srbija

[ilija.klasnic@ieent.org](mailto:ilija.klasnic@ieent.org)

**Kratak sadržaj:** Temperatura namotaja rotora sinhronog generatora predstavlja jedno od pogonskih ograničenja naznačenih u pogonskom PQ dijagramu generatora i stoga je što tačnija informacija o njenoj vrednosti od izuzetnog značaja. Ona se može meriti direktno pomoću ugrađenih senzora za merenje temperature ili se određivati indirektnim putem. Sa sve većim učešćem obnovljivih izvora energije u visokonaponskom prenosnom sistemu dolazi do temeljnih promena u načinu rada konvencionalnih proizvodnih jedinica, a tu spadaju i hidrogeneratori koji se suočavaju sa režimima rada koje karakterišu brze promene opterećenja i povećan broj start-stop ciklusa. Ovakav način rada prouzrokuje dodatne termičke i dinamičke stresove delova hidrogeneratora, a prvenstveno delova rotora. Da bi hidrogeneratori mogli da odgovore novim zahtevima koji se pred njih postavljaju potrebno je poznavati termički kapacitet rotora i njegov uticaj na dinamičku pogonsku kartu hidrogeneratora.

**Ključne reči:** hidrogenerator, termički kapacitet, termička vremenska konstanta, temperatura namotaja rotora

### 1. Uvod

Bezbedan i pouzdan rad sinhronog generatora definisan je oblašću unutar odgovarajućeg pogonskog PQ dijagrama. Pogonski PQ dijagram definisan je odgovarajućim ograničenjima. Jedno od njih je i statičko

ograničenje po struji rotora u induktivnom režimu rada. Ovo ograničenje uslovljeno je dozvoljenim zagrevanjem namotaja rotora. Maksimalni dozvoljeni porast temperature namotaja rotora sinhronog generatora definisan je, pre svega, primenjenom klasom izolacije (danas je to najčešće F klasa izolacije čija maksimalna dozvoljena vrednost temperature (*hot spot*) iznosi 155°C) i to je standardni podatak koji se nalazi u proizvođačkoj dokumentaciji. Međutim, u praksi, proizvođači hidrogeneratora za namotaj rotora definišu dozvoljeni porast temperature za nižu klasu izolacije (klasa B) tako da je dozvoljeni porast temperature namotaja rotora (mereno U-I metodom) 80°C iznad temperature hladnog hladioca. Temperatura namotaja rotora sinhronog generatora može se meriti direktno pomoću ugrađenih senzora za merenje temperature (retko) ili odrediti indirektno primenom U-I metode. Oba načina određivanja temperature namotaja rotora imaju svoje prednosti i nedostatke. Osnovna razlika je u tome što se pri direktnom merenju temperature meri lokalna vrednost temperature na namotaju rotora, a koja je odgovarajućim linearnim izrazom povezana sa vrednošću srednje temperature namotaja. Direktno merenje temperature namotaja rotora povezano je i sa sledećim problemima: slabo je prisutno u praksi, postoji problem napajanja mernog sistema, postoji problem prenosa podataka bežičnim putem, postoji problem postavljanja temperaturnog senzora u otežanim uslovima rada itd. S druge strane indirektno određivanje temperature namotaja rotora je prisutno u stručnoj praksi, relativno lako za implementaciju (potrebna su merenja napona i struje rotora generatora), ali daje podatak o srednjoj vrednosti temperature namotaja rotora, a ne o maksimalnoj tj. temperaturi najtoplije tačke. Kod ove metode postoji problem kompenzacije pada napona na četkicama koji je vezan za starenje četkica, vlažnost okoline i zagrevanje napojnih kablova, koji se manje ili više uspešno kompenzuje u nominalnoj radnoj tački. Dodatni problem može biti kvalitet četkica kao i nejednakost naleganja četkica na klizne prstenove i shodno tome postojanje neravnomernosti raspodele struje. Ograničenje u PQ dijagramu sinhronog generatora koje je vezano za dozvoljeno zagrevanje namotaja rotora odnosi se na temperaturu najtoplije tačke (*hot spot*), a ne na srednju vrednost temperature koja može biti značajno manja, mada uvek postoji linearna veza data od strane proizvođača ili dobijena simulacijom termičkog modela između te dve temperature. Što tačnije poznavanje temperaturne slike kompletnog rotora i njene dinamike je očigledno od velikog značaja jer direktno utiču na projektovani životni vek generatora, pogonsku raspoloživost i balansiranje. Životni vek generatora je u direktnoj sprezi sa električnim, mehaničkim i termičkim naprezanjima njegovih delova pa i samog rotora. Pogonska raspoloživost podrazumeva da se u svakom trenutku znaju dinamičke mogućnosti proizvodne jedinice odnosno koliku aktivnu i reaktivnu snagu može da proizvede u kraćem ili dužem vremenskom periodu. Balansiranje između proizvodnje i potrošnje električne energije postaje dodatno složeno sa povećanim učešćem obnovljivih izvora energije (OIE) u prenosnom sistemu. Proizvodnja iz OIE uslovljena je vremenskim prilikama i drugim kompleksnim stohastičkim faktorima, po prirodi je intermitentna i samo statistički predvidiva, a ne i deterministički. Dinamika i fluktuacije u proizvodnji energije iz OIE posmatraju se u vremenskim

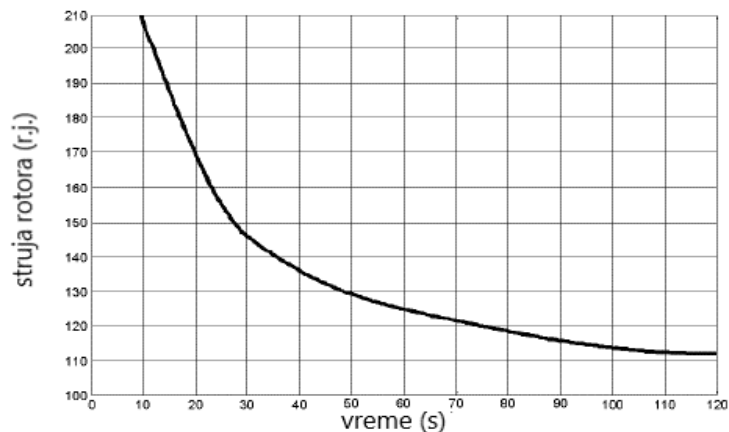
intervalima od nekoliko minuta do nekoliko časova. Promene u proizvodnji električne energije iz OIE moraju se dakle s aspekta balansiranja nadomestiti adekvatno brzo na određeni način: iz uvoza ili iz konvencionalnih izvora koji mogu u kratkim vremenskim intervalima da odgovore novim zahtevima u elektroenergetskom sistemu (hidroelektrane i gasne elektrane). Iz tog razloga se hidrogenatori suočavaju sa novim režimima rada koje karakterišu brze promene opterećenja i povećan broj start-stop ciklusa što posledično utiče na povećan termički stres delova hidrogenatora i skraćenje životnog veka. Da bi mogli da odgovore zahtevima koji se pred njih postavljaju potrebno je precizno odrediti dinamičke mogućnosti ovih proizvodnih jedinica tj. što tačnije poznavati termički kapacitet statora i rotora i njihove termičke vremenske konstante.

## 2. Određivanje termičke vremenske konstante namotaja rotora hidrogenatora

Rad sinhronog generatora moguć je i sa strujom rotora (statora) koja je veća od naznačene sve dok je temperatura namotaja rotora (statora) manja od one koju dozvoljava primenjena klasa izolacije i radni uslovi što je definisano u međunarodnom standardu za ispitivanje električnih obrtnih mašina IEC 60034-1. Proizvođači generatora definišu koliko vremena generator može da radi sa strujom rotora većom od naznačene. U ovakvim uslovima rada potrebno je obezbediti da limiter maksimalne struje rotora dozvoljava strujno preopterećenje određeno vreme u zavisnosti od veličine tog preopterećenja. Uloga limitera maksimalne struje rotora (pobude) je da omogući adekvatnu zaštitu od pregrevanja rotora usled proticanja struje veće od naznačene ali i da istovremeno omogući maksimalno forsiranje po struji pobude u slučajevima kada treba održati stabilnost sistema. U [1] limiter maksimalne struje rotora definisan je sledećom jednačinom:

$$t = \frac{A}{(I_f^B - C)} \quad (1)$$

gde su A, B i C konstante koje iznose 33.75, 2 i 1 respektivno, a  $I_f$  je struja pobude u relativnim jedinicama [1]. Inverzna vremenska zavisnost opisana jednačinom (1) grafički je prikazana na slici 1.



Slika 1. Dozvoljeno preopterećenje po struji rotora prema standardu IEEE 421.5-2005

Prethodno pomenuti zahtevi koji se postavljaju pred hidrogeneratore usled sve većeg učešća OIE podrazumevaju česte i ne tako male promene snage. Vetroelektrane generišu aktivnu snagu koja pulsira u vremenskim intervalima od nekoliko minuta pa do par desetina minuta. Te varijacije aktivne snage u pojedinim važnim čvorovima prenosne mreže treba pratiti sa adekvatnim varijacijama injektovane reaktivne snage da bi se naponi čvorova prenosne mreže održavali u zahtevanom opsegu vrednosti. Povećavanjem pobudne struje povećava se injektovana reaktivna snaga generatora, a samim tim usled porasta struje rotora dolazi i do porasta temperature namotaja rotora usled porasta Džulovih gubitaka snage u namotaju rotora. Zbog svega navedenog jasno je da je poznavanje dinamičke rezerve u termičkom kapacitetu rotora od velikog značaja za buduću eksploataciju, a samim tim i poznavanje termičke vremenske konstante namotaja rotora [2]. Dinamička rezerva (oblast rada sa preopterećenjem po struji rotora) podrazumeva određenu oblast rada izvan pogonskog dijagrama u induktivnoj zoni u kojoj generator može kratkotrajno da radi kada se za to ukaže potreba, u cilju održavanja naponske stabilnosti. Veličina ove zone zavisi od vrednosti temperature namotaja rotora i vrednosti struje rotora pre preopterećenja.

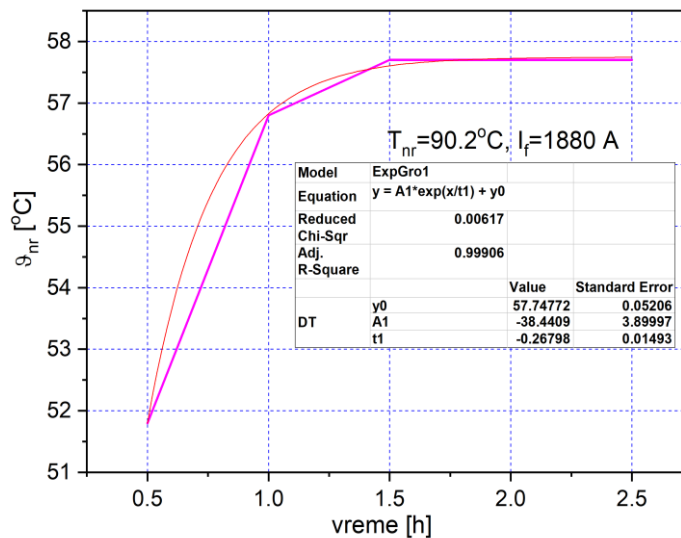
Porast srednje temperature namotaja rotora  $\vartheta_{nr}(t)$  može se izračunati primenom sledeće formule [3]:

$$\vartheta_{nr} = \vartheta_{nr0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + \vartheta_{nr\infty} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (2)$$

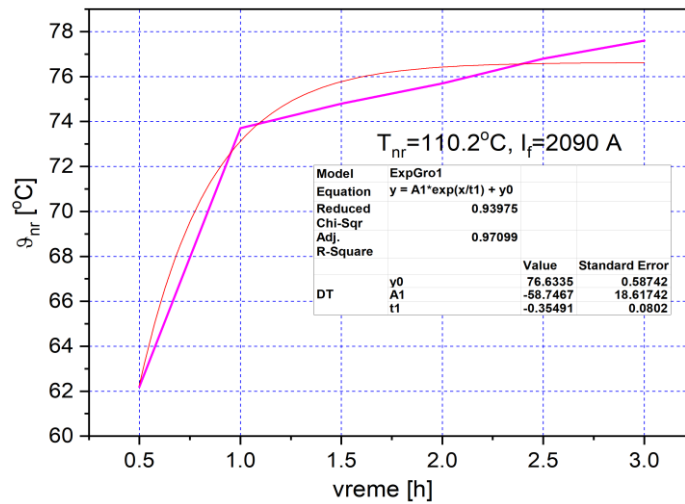
gde je  $\tau$  – termička vremenska konstanta namotaja rotora,  $\vartheta_{nr0}$  – početni porast temperature namotaja rotora u trenutku  $t=0$  u odnosu na rashladni fluid (vazduh, vodonik, voda i dr.) i  $\vartheta_{nr\infty}$  – ustaljeni porast temperature namotaja rotora u termički ustaljenom stanju u odnosu na hladni vazduh.

Za određivanje termičke vremenske konstante namotaja rotora korišćeni su podaci snimljeni tokom primopredajnih ispitivanja revitalizovanog agregata A1 u HE “Đerdap 1”, konkretno oglada zagrevanja [4]. Za potrebe oglada

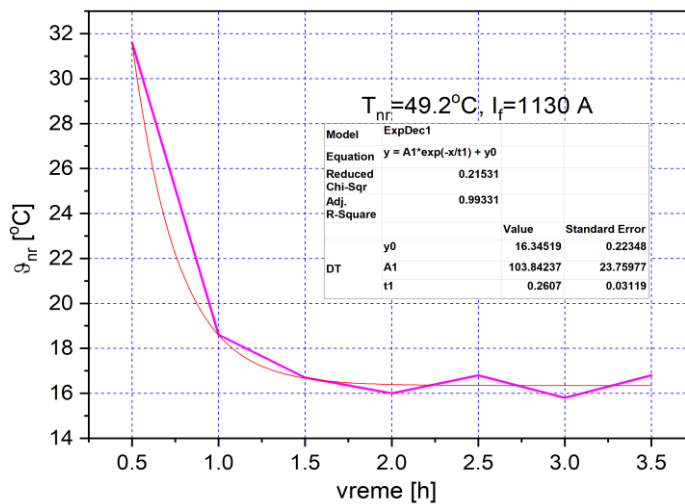
zagrevanja bilo je potrebno ustanoviti postignuta termički ustaljena stanja pa nije snimljen ceo proces prelaska iz jednog u drugo termički ustaljeno stanje. S obzirom da je na tačnost određivanja termičke vremenske konstante od velikog značaja početni deo prelaznog režima između dva termički ustaljena stanja dobijene rezultate treba prihvatiti s izvesnom rezervom. U cilju što tačnijeg određivanja termičke vremenske konstante namotaja rotora neophodno je sa dovoljno velikom vremenskom rezolucijom (npr. jednominutnom) snimati promenu temperature namotaja rotora prilikom prelaska iz jednog u drugo termički ustaljeno stanje. Na slikama 2 do 4 prikazani su rezultati obrade snimljenih podataka u cilju određivanja termičke vremenske konstante namotaja rotora revitalizovanog agregata A1 u HE "Đerdap 1" [2]. Ljubičastom linijom prikazan je porast temperature namotaja rotora glavnog generatora A1 u funkciji vremena tokom ogleđa zagrevanja, a crvenom linijom estimirana vrednost korišćenjem ekponencijalne funkcije jer upravo ona opisuje promenu temperature namotaja rotora u funkciji vremena. Na slikama 2 i 3 prikazan je prelazak iz jednog termički stacionarnog stanja u drugo termički stacionarno stanje sa većom temperaturom namotaja rotora (na slici 2 temperatura namotaja rotora u novom stacionarnom stanju iznosi 90,2°C, a na slici 3 iznosi 110,2°C) tj. proces zagrevanja, dok je na slici 4 prikazan prelazak iz toplijeg stacionarnog stanja u termički stacionarno stanje sa manjom temperaturom namotaja rotora koja je bila jednaka 49,2°C tj. proces hlađenja.



Slika 2. Zavisnost porasta temperature namotaja rotora glavnog generatora A1 u funkciji vremena; struja pobude je približno konstantna i jednaka 1880 A. Estimirana vremenska konstanta je  $\tau = 0,268 \text{ h}$ .



Slika 3. Zavisnost porasta temperature namotaja rotora glavnog generatora A1 u funkciji vremena; struja pobude je približno konstantna i jednaka 2090 A. Estimirana vremenska konstanta je  $\tau = 0,355 \text{ h}$ .



Slika 4. Zavisnost porasta temperature namotaja rotora glavnog generatora A1 u funkciji vremena; struja pobude je približno konstantna i jednaka 1130 A. Estimirana vremenska konstanta je  $\tau = 0,261 \text{ h}$ .

Na osnovu slika 2 do 4 estimirana vrednost termičke vremenske konstante namotaja rotora iznosi između 16 i 21 minut. Analizom prikazanih rezultata na slikama 2 do 4 ustanovljeno je da je kritičan vremenski period potreban za što tačniju estimaciju u trajanju od 1,5 do 2 vremenske konstante od početka prelaka iz jednog u drugo termički ustaljeno stanje i da tada treba vršiti snimanje sa većom vremenskom rezolucijom.

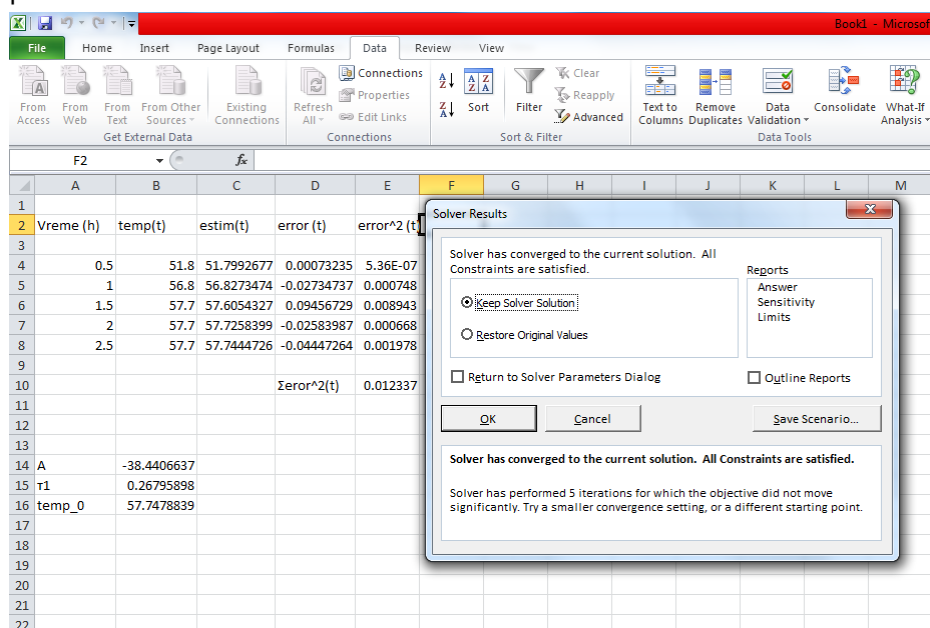
Matematički metod estimacije eksponencijalne funkcije porasta temperature u vremenu je minimizacija ukupne kvadratne greške. Postupak je sproveden pomoću programa Excel. Odnosno njegove add-in funkcije solver. Na slici 5 je prikazan deo radne tabele Excela u kojoj su postavljeni parametri za estimaciju prema podacima prikazanim na slici 2.

	A	B	C	D	E
2	Vreme (h)	temp(t)	estim(t)	error (t)	error^2 (t)
4	0.5	51.8	53.639184	-1.83918396	3.382598
5	1	56.8	52.2072766	4.59272335	21.09311
6	1.5	57.7	51.338781	6.36121904	40.46511
7	2	57.7	50.8120117	6.8879883	47.44438
8	2.5	57.7	50.49251	7.20749001	51.94791
9				Error^2(t)	164.3331
14	A	6			
15	tau1	1			
16	temp_0	50			

Slika 5. Postavljanje srednjekvadratnog modela greške za optimizaciju pomoću Excel solvera

Kolona A sadrži vremenski trenutak očitavanja merenja, izraženo u satima od početka merenja. Kolona B sadrži izmerene vrednosti razlike temperatura rotora (srednje vrednosti) i temperature hladnog rashladnog vazduha. Kolona C sadrži estimirane vrednosti razlike temperature rotora. Estimacija je vršena prema Excel izrazu  $=+B\$14*EXP(-A4/B\$15)+B\$16$ , gde je **A4** vrednost vremenskog trenutka očitavanja. Kolona D sadrži razliku merene i estimirane vrednosti razlike temperaturra, ovde označenu kao greška estimacije razlike temperatura. Kolona E sadrži kvadrate grešaka estimacije razlike temperatura a ćelija **=E10** sadrži zbir kvadrata grešaka estimacije i njen sadržaj je vrednost koju Excel solver minimizira varijacijom

vrednosti parametara. Parametri modela koje solver varira se nalaze u ćelijama **\$B\$14:\$B\$16** i redom sadrže amplitudu eksponencijalnog člana, vremensku konstantu estimiranog termičkog procesa i konstantan član. Važno je postaviti početne vrednosti parametara za optimizaciju koje su dovoljno bliske pretpostavljenim rešenjima. U ovom slučaju je za inicijalnu vrednost amplitude eksponencijalnog člana odabrana razlika krajnje i početne vrednosti razlika temperatura, termička vremenska konstanta je grubo ocenjena da je 1h i slobodan član je postavljen na nivou polazne temperature, odnosno par stepeni ispod. Metod optimizacije koji je odabran je modifikovani gradijentni postupak. Pritiskom na dugme OK solvera, dobija se rezultat prikazan na slici 6.



Slika 6. Rezultat minimizacije srednjekvadratne greške pomoću Excel solvera  
Ovako dobijene vrednosti parametara odgovaraju onima sa slike 2.

### 3. Poređenje termičke dinamike namotaja rotora hidrogeneratora sa dinamikom definisanom karakteristikom odrade limitera maksimalne struje pobude

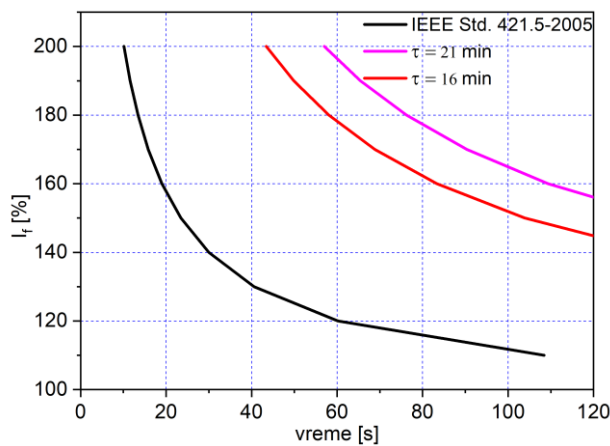
U cilju poređenja raspoloživog termičkog kapaciteta namotaja rotora i limitera maksimalne struje pobude neophodno je odrediti vreme potrebno da se dostigne granični porast temperature namotaja rotora (definisan primenjenom klasom izolacije i naznačen na natpisnoj pločici generatora) prilikom preopterećenja po struji rotora uvažavajući termičku dinamiku rotora



preko određene termičke vremenske konstante. Navedeno vreme se izračunava iz sledeće jednačine koja je izvedena na osnovu termičkog modela namotaja rotora [5]:

$$t = -\tau * \ln \left( \frac{A * I_f^2 + B - \vartheta_{max}}{A * (I_f^2 - I_{f0}^2)} \right) \quad (3)$$

U jednačini (3) koeficijenti A i B su koeficijenti statičkog modela srednje temperature namotaja rotora u funkciji kvadrata struje pobude i temperature hladnog rashladnog vazduha,  $\tau$  – termička vremenska konstanta namotaja rotora,  $I_f$  i  $I_{f0}$  struja pobude u termički ustaljenom stanju ( $t \rightarrow \infty$ ) i u početnom trenutku  $t=0$ , respektivno. Na slici 7 crnom bojom prikazana je karakteristika limitera struje pobude definisana u jednačini (1), a narandžastom i ljubičastom bojom prikazane su krive definisane jednačinom (3) za vrednost termičke vremenske konstante od 16 i 21 minut.



Slika 7. Karakteristika limitera maksimalne struje rotora (sa Slike 1) i familije krivih iz jednačine (3) za hidrogenerator A1 u HE "Đerdap 1"

Na osnovu Slike 7 evidentan je uticaj termičke vremenske konstante namotaja rotora sinhronog generatora kada je potrebno raditi sa strujom pobude koja je veća od naznačene. U tom smislu potrebno je poznavati njenu što tačniju vrednost, a kako ona nije u standardnom setu podataka koju dostavlja proizvođač generatora, neophodno je izvršiti posebna merenja u samoj elektrani u cilju njenog što tačnijeg određivanja.

## 4. Zaključak

U radu je opisan značaj i prikazan je praktičan način određivanja termičke vremenske konstante namotaja rotora sinhronog hidrogeneratora A1 u HE "Đerdap 1". Date su smernice kako postići veću tačnost estimacije termičke vremenske konstante namotaja rotora. Takođe, akcentovan je značaj pravilne procene termičkog kapaciteta rotora, a na osnovu termičkog modela rotora imajući u vidu najavljeni veliko učešće OIE u elektroenergetskom prenosnom sistemu Republike Srbije i buduću potrebu za kratkotrajno brzo injektovanje reaktivne snage u čvorove prenosnog sistema zbog dinamike rada vetroparkova.

## Literatura

- [1] *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*, IEEE Std 421.5-2005
- [2] Optimizovano praćenje termičkog stanja rotora hidrogeneratora radi poboljšanja pouzdanosti i produženja operativnog životnog veka konvencionalnog hidrogeneratora u realnom vremenu, Elaborat broj 222052, Elektrotehnički institut Nikola Tesla ad Beograd, 2022.
- [3] Yildiz Bayazitoglu, M. Necati Ozisik *Elements of HEAT TRANSFER*, , McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [4] Izveštaj o primopredajnim ispitivanjima revitalizovanog agregata A1 u HE „Đerdap1“, sveska 1, Merenje električnih veličina, Elektrotehnički institut Nikola Tesla ad Beograd, 2017.
- [5] Temperaturni monitoring rotora sinhronih generatora, statistička obrada i analiza temperaturnih režima rada i uticaj na pogonska ograničenja, Elaborat broj 221026, Elektrotehnički institut Nikola Tesla ad Beograd, 2022.

**Abstract.** Field winding temperature of the synchronous generator is one of limiting factors shaping generator PQ capability curve. Therefore of great operational importance is to have information about this temperature estimated with the utmost accuracy. It can be measured directly using built-in temperature sensors or determined indirectly. With the increasing penetration of renewable energy sources into the high-voltage transmission system, the fundamental changes happen in the way conventional generating units work, including hydrogenerators. They are facing the new operating modes characterized by rapid load changes and an increased number of start-stop cycles. These modes of operation lead to additional thermal stress of the hydrogenerator parts, including the rotor. In order to be able to respond to new demands that they are faced with, it is necessary to estimate the actual thermal capacity of the rotor and its influence on the dynamic hydrogenerator PQ capability curve.

**Keywords:** hydrogenerator, thermal capacity, field winding thermal time constant, temperature of field winding

## **Estimation of Hydrogenerator Rotor Dynamic Thermal Margine**

Ilija Klasnić, Dragan Belonić, Žarko Janda, Jasna Dragosavac, Zoran Ćirić,

Rad primljen u uredništvo: 14.12.2022. godine.

Rad prihvaćen: 26.12.2022. godine.

