

Brzo procenjivanje mogućnosti za apsorpciju i generisanje reaktivne snage elektrane u tački priključenja

Nikola Georgijević, Ana Radovanović, Milan Milinković, Dragan Đorđević

Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"

Elektrotehnički fakultet

Univerzitet u Beogradu

Beograd, Srbija

nikola.georgijevic@icent.org

Sadržaj – Sa pogonskih dijagrama (P-Q kriva) generatora mogu se jednostavno utvrditi vrednosti minimalne i maksimalne reaktivne snage za definisanu vrednost aktivne snage generatora. Međutim, za potrebe rada dispečera važne su i procene o dostupnom opsegu reaktivne snage u tački priključenja cele elektrane na prenosnu mrežu. U ovom radu najpre je prikazana procedura za ispitivanje mogućnosti za apsorpciju i generisanje reaktivne snage u tački priključenja jedne grupe koju čine blok transformator (BT) i generator, za različite vrednosti aktivne snage generatora (P_G) i napona u tački priključenja (U_m). Predložena procedura za određivanje maksimalnog opsega reaktivnog opsega je zasnovana na rešavanju optimizacionog proračuna za svaki par vrednosti (P_G, U_m) ponaosob, pri čemu se uvažavaju ograničenja po vrednosti napona na generatoru, ograničenja koja su definisana pogonskom kartom generatora i položaj regulacione sklopke BT. Na osnovu prikazane procedure, izvršen je proračun minimalnih i maksimalnih apsorpcija reaktivne snage (Q_{min}, Q_{max}) za veliki broj različitih kombinacija (P_G, U_m). Rezultati ovog proračuna su zatim iskorišćeni za formiranje neuralne mreže koja je u stanju da na osnovu unetog para parametara (U_m, P_G) precizno rekonstruiše (Q_{min}, Q_{max}) vrednosti na u tački priključenja, što je čini praktičnom alatkom za brzu procenu preostalog opsega za regulaciju napona.

Ključne reči – regulacija, napon, neuralne mreže

I. UVOD

U svetlu deregulacije elektroenergetskih sistema (EES), od operatora prenosnog sistema (OPS) traži se velika fleksibilnost u pogledu prenosa snaga. Sa druge strane, opterećenja dalekovoda bitno utiču na naponske prilike koje vladaju u mreži. Ovo za sobom povlači probleme vezane za regulaciju napona, te zahteva koordinisano delovanje OPS i proizvođača električne energije.

Kako bi se izborili sa ovim problemom OPS su prinuđeni da definišu zahteve po pitanju regulacije napona kako za konvencionalne tako i za obnovljive izvore električne energije. Primera radi, Pravilima o radu prenosnog sistema JP EMS [1], u poglavlju Regulacija napona, tačka 4.3.7, propisana je karakteristika $\cos\phi_m-U_m$ (gde U_m predstavlja napon u tački priključenja, a $\cos\phi_m$ faktor snage na pragu elektrane), koju

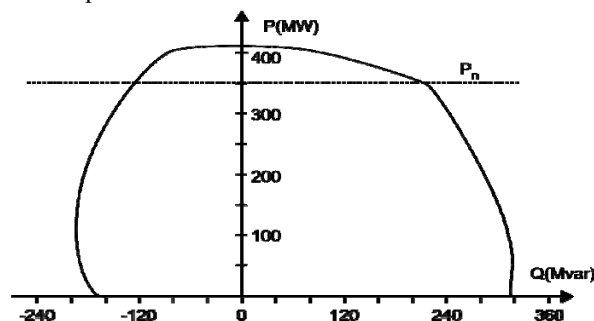
mora da zadovolji svaka nova jedinica u EES Srbije. Međutim, navedena karakteristika važi za fiksiranu vrednost aktivne snage, a čak i u tom slučaju je nije jednostavno sračunati za proizvoljnu jedinicu.

Prilikom izrade [2], razvijena je procedura za proračun $\cos\phi_m-U_m$ karakteristike u tački priključenja. U ovom radu je navedena procedura proširena tako što se umesto jedne fiksirane aktivne snage generatora posmatraju sve vrednosti iz dozvoljenog opsega. Time je dobijen pogonski dijagram na visokonaponskoj (VN) strani bloka.

Rad je organizovan na sledeći način: u poglavlju II su prikazani ulazni podaci koji su kasnije korišćeni za proračune, a zatim je (u poglavlju III) predstavljena procedura proračuna iz [2]. U poglavlju IV dati su rezultati proračuna, dok je u poglavlju V prikazana aproksimacija dobijenih rezultata neuralnim mrežama. Na osnovu aproksimacije pogonskog dijagrama u tački priključenja jedne jedinice, prikazana je mogućnost za aproksimaciju reaktivnih sposobnosti cele elektrane koja se sastoji od više jedinica. U poglavlju VI date su zaključne napomene. Svi proračuni sprovedeni su u programskom paketu Powerfactory, proizvođača DigSilent, verzija 15.2, koji je namenjen analizama EES.

II. OSNOVNI PODACI O ANALIZIRANOJ JEDINICI

Predmet analize je termo blok sa pogonskim dijagramom generatora prikazanim na Sl 1.

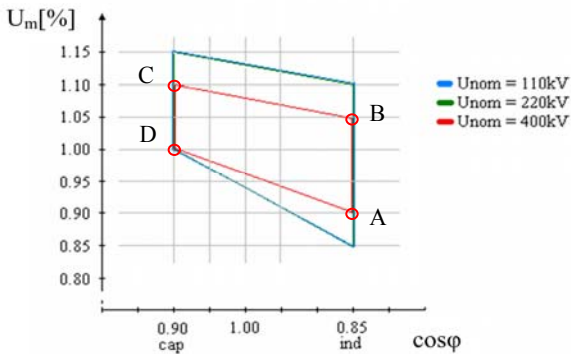


Slika 1. Pogonski dijagram analizirane jedinice

Prividna snaga generatora je $S_{nG}=411,7$ MVA, $\cos\varphi_{nG}=0,85$, $U_{nG}=20$ kV. Važno je istaći da je ovaj generator vrlo fleksibilan po pitanju mogućnosti rada u kapacitivnom režimu (pri nominalnoj snazi $\cos\varphi_g \approx 0,9$ cap). Nominalna prividna snaga BT-a je $S_{nBT}=411,7$ MVA, a prenosni odnos $t_0=410/22$ kV/kV, sa tri otepa za promenu prenosnog odnosa ($t=t_0 \pm 3\%$). Promena prenosnog odnosa BT-a moguća je samo u beznaponskom stanju.

III. PROCEDURA ZA ISPITIVANJE MOGUĆNOSTI ZA APSORPCIJU I GENERISANJE REAKTIVNE SNAGE U TAČKI PRIKLJUČENJA

Karakteristika $\cos\varphi_m - U_m$ definisana u Pravilima o radu prenosnog sistema [1], tačka 4.3.7.1, data je na Sl. 2. U ovom radu je analizirana tačka priključenja na 400 kV, koja je predstavljena crvenom bojom.



Slika 2. Zahtevi vezani za regulaciju napona iz Pravila o radu prenosnog sistema. Slika je preuzeta iz [1]

Za potrebe proračuna površi koje obuhvata generator u odnosu na zahteve sa Sl. 2, granična kriva koju doseže generator je podeljena na četiri segmenta po ugledu na trapez ABCD: $A_{opt}B_{opt}$, $B_{opt}C_{opt}$, $C_{opt}D_{opt}$ i $D_{opt}A_{opt}$, gde su sa indeksom opt označene granične tačke krive agregata koje se dobijaju primenom optimizacionog proračuna. Za proračun segmenata sa maksimalnom reaktivnom snagom $A_{opt}B_{opt}$ i $B_{opt}C_{opt}$ izvršen je optimizacioni proračun (1) za niz fiksniranih tačaka napona na visokonaponskoj (VN) strani BT-a ($u_{m,i}$) i fiksniranih aktivnih snaga generatora $P_{G,i}$.

$$\begin{aligned} & \max (Q_{VN}), \\ & \begin{aligned} & u_m = u_{m,j} \\ & P_G = P_{G,j} \\ & Q_{G,\min}(P_{G,j}) \leq Q_{G,j} \leq Q_{G,\max}(P_{G,j}) \\ & 0.95 \leq u_G \leq 1.05 \\ & t = t_0 \pm k \cdot 0.03, k = -1, 0, 1 \end{aligned} \end{aligned} \quad (1)$$

Za proračun segmenta $C_{opt}D_{opt}$ i $D_{opt}A_{opt}$ izvršen je optimizacioni proračun (2).

$$\begin{aligned} & \min (Q_{VN}), \\ & \begin{aligned} & u_m = u_{m,j} \\ & P_G = P_{G,j} \\ & Q_{G,\min}(P_{G,j}) \leq Q_{G,j} \leq Q_{G,\max}(P_{G,j}) \\ & 0.95 \leq u_G \leq 1.05 \\ & t = t_0 \pm k \cdot 0.03, k = -1, 0, 1 \end{aligned} \end{aligned} \quad (2)$$

U prethodnim formulama su:

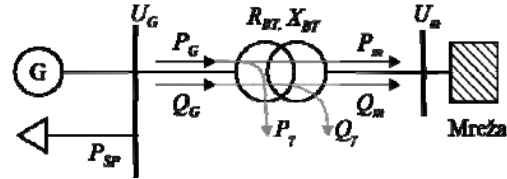
- Q_{VN} - reaktivna snaga na pragu elektrane,
- $u_{m,j}$ - niz fiksniranih tačaka na VN strani BT,
- $P_{G,j}$ - niz fiksniranih aktivna snaga generatora,
- Q_G - reaktivna snaga generatora,

- u_G - napon na priključcima generatora,
- t_0 - prenosni odnos BT-a sa neutralnom pozicijom,
- t - prenosni odnos BT-a pri k-toj poziciji otepa.

Optimizacija je sprovedena korišćenjem Python programskog paketa DEAP (*Distributed Evolutionary Algorithms in Python*) [3]. Ovaj paket poseduje modul za optimizaciju kriterijumskih funkcija u formi crne kutije (*blackbox optimization*), pomoću PSO (*Particle Swarm Optimization*) algoritma. Ovim alatom moguće je direktno zadati kriterijumsku funkciju koja se optimizuje (bez analitičkog izraza prvih izvoda), kao i nelinearnih ograničenja tipa jednakosti i nejednakosti. Optimizacioni proračuni iz (1) i (2) se u generalnom slučaju ne mogu jednostavno rešiti u zatvorenoj analitičkoj formi zbog ograničenja definisanih pogonskim dijagramom koje dostavlja proizvođač. Pored PSO algoritma za optimizaciju je moguće koristiti i genetske algoritme.

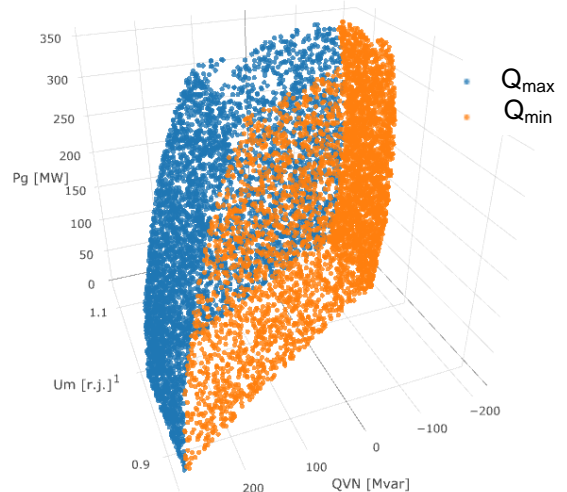
IV. REZULTATI PRORAČUNA POGONSKOG DIJAGRAMA U TAČKI PRIKLJUČENJA

Zamenska šema na osnovu koje su vršeni proračuni prikazana je na Sl. 3. Za potrebe ovog rada, nije analizirana sopstvena potrošnja ($P_{SP}=0$). Na slici su naznačeni tokovi snaga generatora sa indeksom G, tokovi ka mreži (indeks m) i gubici aktivne i reaktivne snage na BT-u (indeks γ). U svim analiziranim slučajevima prenosni odnos BT-a je fiksiran na neutralnu poziciju ($t=t_0$).



Slika 3. Zamenska šema na osnovu koje su vršeni proračuni

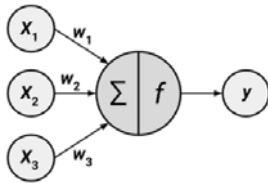
Rezultati proračuna minimalnih i maksimalnih apsorpcija reaktivne snage (Q_{min} , Q_{max}) za veliki broj različitih kombinacija (P_G , U_m) prikazani su na Sl. 4.



Slika 4. Rezultati proračuna minimalnih i maksimalnih apsorpcija reaktivne snage (Q_{min} , Q_{max}) za veliki broj različitih kombinacija (P_G , U_m).

V. APROKSIMACIJA NEURALNIM MREŽAMA

Neuralne mreže (NM) predstavljaju novu generaciju sistema za informaciono procesiranje. NM pokazuju osobinu učenja, memorisanja i generalizacije na osnovu podataka kojima se obučavaju. Pokazano je se da su vrlo efikasne u zadacima kao što su klasifikacija oblika, aproksimacija funkcija, optimizacija, vektorska kvantizacija, klasterizacija podataka... U ovom radu NM je iskorišćena za potrebe aproksimacije ravni koje predstavljaju minimalnu, odnosno maksimalnu apsorpciju reaktivne snage u tački priključenja za različite vrednosti U_m i P_G . NM se sastoje od velikog broja gusto povezanih procesorskih elemenata (takozvanih čvorova, "nodes") koji uobičajeno rade u paraleli (jednovremeno) i koji su organizovani po utvrđenim arhitekturama. Razvoj NM je nastao motivacijom da se modeluje ponašanje (bioloških) neurona u mozgu. Zbog toga se vrlo često neuralnim mrežama dodaje atribut "veštačke" neuralne mreže (*Artificial Neural Networks* – ANN). Budući da su NM mreže sa namerom matematički modelovane tako da oponašaju rad čovekovog mozga, matematički model jednog neurona NM se može posmatrati na sličan način. Kako je naznačeno na Sl. 5, model neurona definiše matematičku vezu između ulaznih signala (x varijable) i izlaznih signala (y varijable). Kao kod biološkog neurona, signal sa svakog ulaza (dendrita) je ponderisan sa težinskim faktorom (w) prema svojoj važnosti. Ulazni signali su nakon skaliranja sumirani unutar čvora i nad njima je izvršena funkcija aktivacije (f).

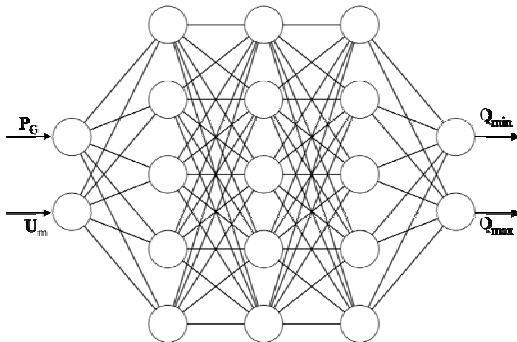


Slika 5. Gradivna komponenta neuralnih mreža – veštački neuron

Tipični neuron sa n ulaznih dendrita se može predstaviti preko (3):

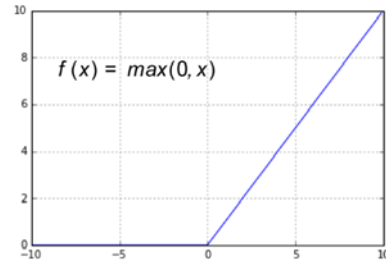
$$y(x) = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i\right) \quad (3)$$

Težinski faktori w omogućavaju svakom od ulaza x da više ili manje utiču na sumu ulaznih signala. Ukupna suma se koristi kao ulaz za funkciju aktivacije f , a vrednost na izlazu neurona je $y(x)$.



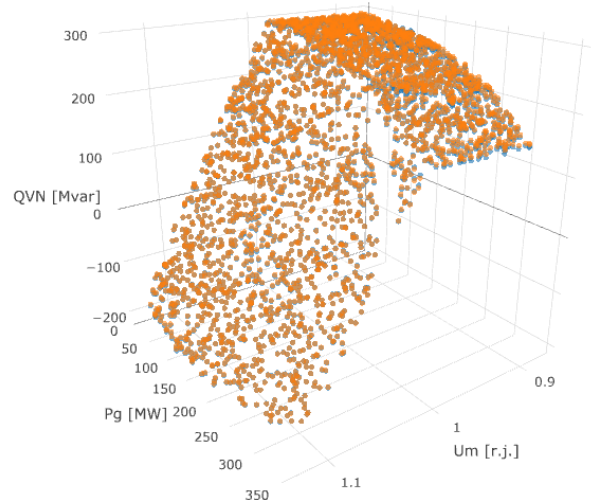
Slika 6. Struktura neuralne mreže

U neuralnim mrežama se koriste veštački neuroni definisani sa (3) kao gradivni elementi pomoću kojih je moguće napraviti kompleksne modele i oponašati kompleksne matematičke funkcije. Iako postoji mnogo varijanti neuralnih mreža, one se mogu kategorizovati prema strukturi mreže, funkciji aktivacije i kriterijumskoj funkciji koja se optimizuje. [4]. Na Sl. 6 prikazana je struktura neuralne mreže koja je u ovom radu iskorišćena za potrebe aproksimacije (Q_{min} , Q_{max}) na osnovu (P_G , U_m). Predložena struktura je primenljiva u slučajevima kada je na sekundar BT priključen jedan generator. Za slučajeve sa više generatora, može se dodati više ulaza P_{Gi} (npr. P_{G1} , P_{G2} ...) Kao funkcija aktivacije uzeta je takozvana RELU funkcija prikazana na Sl. 7. [4]



Slika 7. RELU funkcija aktivacije [4]

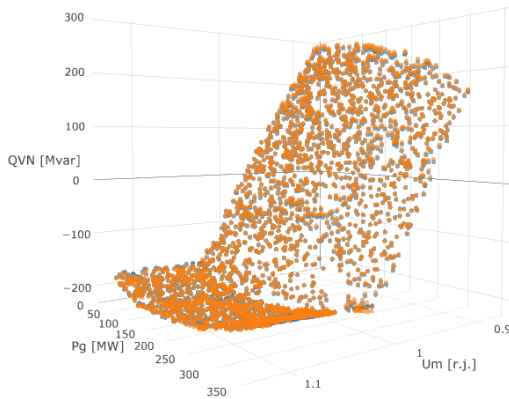
Nakon procesa optimizacije (fitovanja modela), dobijen je model NM koji može da oponaša površi $Q_{min}(U_m, P_G)$, $Q_{max}(U_m, P_G)$ sa srednjom vrednosti greške od 0,6 Mvar. Rezultati aproksimacije test tačaka za vrednosti Q_{max} prikazani su na Sl. 8, dok su rezultati za Q_{min} prikazani na Sl. 9. NM su izabrane kao alat zato što se njima na relativno jednostavan način mogu aproksimirati površi sa Sl. 8 i Sl. 9. NM su trenirane na 70% uzoraka, a ostalih 30% se koristi za verifikaciju. Ako je mali broj uzoraka, ili ako nisu dovoljno utrenirane, NM mogu dati pogrešno rešenje [4].



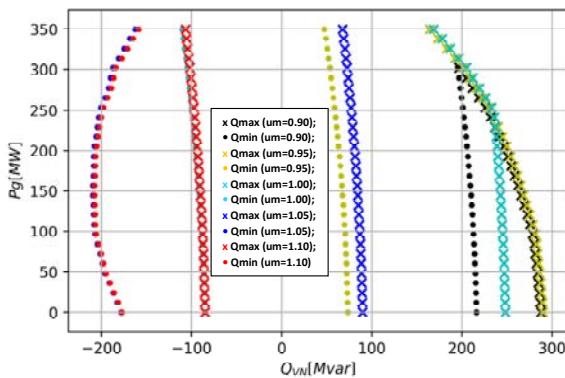
Slika 8. Rezultati aproksimacije test tačaka za vrednost Q_{max} .

Rekonstrukcija pogonskog dijagrama na VN strani preko fitovane NM prikazana je na Sl. 10 i to za naponske nivoe od 0.9 r.j. do 1.1 r.j. u koracima od 0.05 r.j. u tački priključenja. Primetno je sužavanje opsega reaktivne snage za različite

vrednosti napona. Kada su visoki naponi, sužavaju se mogućnosti za plasman reaktivne snage, a kada su naponi niži, smanjuju se mogućnosti za apsorpciju.

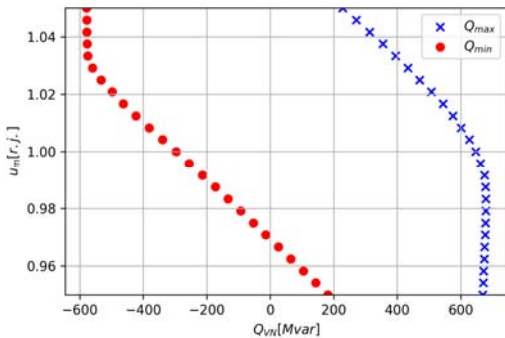


Slika 9. Rezultati aproksimacije test tačaka za vrednost Q_{min} .



Slika 10. PQ dijagram na VN strani bloka za različite vrednosti napona u tački priključenja (Izlaz iz NM)

Još jedna generalizacija prikazana je na Sl. 11. Tu je izrađen $Q_{VN} - U_m$ dijagram za hipotetičku elektranu koja se sastoji od tri identična agregata, sa parametrima definisanim u poglavlju II (Q_{VN} se u ovom slučaju odnosi na celu elektranu). Pretpostavljeno je da su sve tri jedinice u pogonu, sa različitim vrednostima dispečovane aktivne snage (350 MW, 150 MW i 250 MW). Vrednosti (Q_{min} , Q_{max}) su date za opsege napona 0.95-1.05 r.j.



Slika 11. $Q_{VN} - U_m$ dijagram u tački priključenja fiktivne elektrane konstruisan pomoću NM. Q_{min} i Q_{max} se odnose na na maksimalno preuzimanje, odnosno injektiranje cele elektrane u tački priključenja.

VI. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana procedura za proračun, a zatim i aproksimaciju pogonskog dijagrama agregata u tački priključenja na prenosnu mrežu. Aproksimacija velikog broja tačaka koje predstavljaju krajnje mogućnosti za injektiranje i apsorpciju reaktivnih snaga na pragu agregata je izvršena pomoću relativno jednostavnih neuralnih mreža. Rezultat je matematička funkcija koja za ulazne parametre (aktivna snaga generatora i napon u tački priključenja) vraća maksimalnu i minimalnu reaktivnu snagu na pragu jedinice. Ovaj pristup je moguće generalizovati tako da se jedna elektrana posmatra kao više jedinica opisanih zasebnim neuralnim mrežama. Time se krajnje mogućnosti apsorpcije i injektije reaktivne snage cele elektrane mogu dobiti prostim sabiranjem izlaza iz neuralnih mreža. Proces aproksimacije predstavljenom neuralnom mrežom je moguće vrlo jednostavno implementirati na računaru – sastoji se od nekoliko množenja vektora i if-else funkcija. Zbog toga je izloženu proceduru moguće vrlo jednostavno integrisati u postojeće sisteme koje dispečeri koriste u svojim svakodnevnim aktivnostima za upravljanje prenosnim sistemom.

LITERATURA

- [1] "Pravila o radu prenosnog sistema", oktobar 2015. godine, Javno preduzeće Elektromreža Srbije, Beograd
- [2] Elaborat "Provera uticaja parametara novog agregata B3 u TE Kostolac B na elektroenergetski sistem", Institut Nikola Tesla, 2015.
- [3] Rainville, De, et al. "Deap: A python framework for evolutionary algorithms." Proc. of the 14th conf. on Genetic comput. ACM, 2012.
- [4] Müller, Andreas C., and Sarah Guido. "Introduction to machine learning with Python: a guide for data scientists." O'Reilly Media, Inc., 2016

ABSTRACT

It is a trivial task to determine maximum and minimum reactive power of a generator from capability curves (P-Q curves), given the active power output. But, for the process of power system control and dispatching, it is very important to be aware of the reactive power capabilities of the whole power plant looking from the point of common coupling (PCC). This paper presents procedure for determination of minimum and maximum output reactive power in the PCC (Q_{min} , Q_{max}), of one unit comprised from the generator and step-up transformer, for multiple values of voltage in PCC (U_m) and generator active power (P_G). Proposed procedure is based on solving multiple optimization problems for each pair of (P_G , U_m) values, with inclusion of generator voltage limits, generator P-Q curve, and step-up transformer ratio. After getting these results, we present a method for precise approximation of (Q_{min} , Q_{max}) surfaces from (P_G , U_m) values, which is based on neural networks. As it is shown in the paper, resulting neural network can be used as a practical tool for fast approximation of reactive power resources of the whole power plant.

FAST APPROXIMATION OF THE POWER PLANT REACTIVE POWER CAPABILITY IN THE POINT OF COMMON COUPLING

Nikola Georgijević, Ana Radovanović,
Milan Milinković, Dragan Đorđević