

MOGUĆNOSTI RADA SINKRONIH GENERATORA U PODUZBUĐENOM STANJU

Prof. dr. sc. Zlatko Maljković, Zagreb

UDK 621.313.322
PREGLEDNI ČLANAK

Mogućnost rada sinkronog generatora u poduzbuđenom stanju definiran je pogonskom kartom generatora. Međutim, stvarno podešenje najvećih iznosa djelatne i kapacitivne jalove snage definirano je podešenjem limitera u regulatoru uzbude generatora. Ti limiteri su u pravilu podešeni na strani sigurnosti, tj. s većim ograničenjem poduzbudnog rada nego je to vidljivo iz pogonske karte. Treba učiniti napor da se prikupe stvarne vrijednosti udešenja limitera barem za veće generatore.

Ključne riječi: generator, limiter, uzbuda, jalova snaga, pogonska karta.

1. UVOD

Mogućnost trajnog rada elektroagregata sa sinkronim strojem u EES-u vidljiva je iz pogonske karte agregata. U poduzbuđenom stanju sinkronog generatora granice rada u pravilu predstavljaju: praktička granica stabilnosti i/ili dodatno zagrijavanje dijelova u čeonom prostoru generatora, minimalna uzbuda, te maksimalna i minimalna djelatna snaga.

Iz teorije sinkronih strojeva poznata je pojava povećanog zagrijavanja dijelova stroja koji se nalaze u čeonom prostoru. To su krajnji bočni dijelovi statorskog paketa (krajnji limovi), te tlačne ploče i tlačni prsti kojima je pritegnut paket statora, kao i ostali konstrukcijski dijelovi u tom čeonom prostoru stroja koji su izvedeni od magnetskog materijala. Fizikalno tumačenje zasniva se na postojanju aksijalnog magnetskog toka nastalog uzbuđenim i armaturnim protjecanjem u čeonom prostoru, tj. u dijelu stroja izvan statorskog paketa. Intenzitet aksijalne komponente rasipnog polja predočene silnicama koje aksijalno ulaze u bočne strane statora direktno utječe na intenzitet stvaranja vrtložnih struja u dijelovima stroja u čeonom prostoru, a time i na povećane gubitke i zagrijavanje tih dijelova. Ta aksijalna komponenta polja je to veća što je stroj opterećeniji kapacitivnom strujom, tj. pri radu u poduzbuđenom stanju, dakle u pogonskom stanju kada stroj šalje u mrežu osim djelatne i kapacitivnu komponentu struje. Pojednostavljeno fizikalno tumačenje dobiva se vektorskim dijagramima protjecanja i magnetske indukcije, koji vrijedi za rasipna polja armaturnog i uzbuđenog namota u čeonom prostoru [1]. Problemi su izraženiji kod turbogeneratora, pogotovo većih snaga, gdje su u pravilu i veća specifična opterećenja. Svjetski proizvođači velikih stro-

jeva, u pravilu, danas rješavaju problem povećanog zagrijavanja nekom od metoda koje su prikazane u t.3, tako da je poduzbuđeno pogonsko stanje ograničeno praktičnom granicom statičke stabilnosti. Međutim, kod instaliranih generatora može se pretpostaviti da to nije u potpunosti uspješno riješeno, pogotovo kod onih starijih (starijih od npr. 20 godina). Postoje iskustva da proizvođač ni nakon upita korisnika nije argumentirao ograničenja koja je odredio pogonskom kartom za trajni rad u poduzbuđenom stanju, bilo zbog nepoznavanja problema u potpunosti, ili poznavajući problem koji nije efikasnom mjerom riješio, pa se na taj način osiguravao da ne nastupi dodatno zagrijavanje [2].

U domaćoj literaturi taj je fenomen obrađivan (još) prije više od 25 godina. Tako npr. u [3] eksperimentalnom je provjerom zagrijavanja dijelova u čeonom prostoru generatora HE Orlovac (generator 1) potvrđena zakonitost da pri prijelazu iz induktivnog u kapacitivno pogonsko stanje, uz održavanje približno istog djelatnog ili strujnog opterećenja (po iznosu), treba očekivati porast vrijednosti aksijalne komponente indukcije i temperature u čeonim dijelovima generatora (krajnji paketi, tlačne ploče, bandažni prstenovi).

U [4] su predočeni dijagrami povećanih temperatura na ključnim mjestima (krajnji dioni paket i tlačna ploča) za dva hidrogeneratora (190 MVA i 167 MVA) iz kojih se uočava značajnije povišenje temperature krajnjih limova paketa statora.

U [5] predočen je pregled tri tipa limitera minimalne uzbude, odnosno ograničenja rada u poduzbuđenom stanju (američki, te stariji i noviji europski tip). Ograničivač je sastavni dio automatskog regulatora napona, a počinje djelovati povećavajući uzbudu kad djelatna i jalova snaga nadmaše odgovarajuće vrijednosti

u kapacitivnom kvadrantu pogonske karte. Uređaj djeluje tako da s regulacije konstantnog napona sabirnica prelazi na regulaciju po jalovoj snazi generatora, u skladu s udešenom proradnom karakteristikom, a napon generatora u tom režimu slijedi promjene napona sustava.

Neka iskustva iz 80-tih godina dana su u [2] za turbogeneratore snaga većih od 200 MW. Na starijim turbogeneratorima na kojima nisu poduzete mjere za smanjenje gubitaka u čeonom prostoru najugorženiji su bočni statorski limovi u zoni od 1/2 do 2/3 visine zuba.

Pokušaji računanja magnetskog polja i na temelju toga dobivanja zagrijavanja dijelova u čeonom prostoru velikih turbogenerators prikazani su u [6], [7] i [8].

Način približnog konstruiranja pogonskog dijagrama za poduzbuđeno stanje dobiven primjenom mjerenja aksijalne komponente indukcije u praznom hodu i pod opterećenjem turbogeneratora, predložen je u [9]. Na taj se način mogu definirati točke dodatne kružnice kojom je definirano jednako zagrijavanje čeonog prostora generatora. Time se dobiva granica rada u poduzbuđenom stanju, ako je zagrijavanje dijelova u čeonom prostoru limitirajući faktor, dakle u slučaju kad je to stroži zahtjev od praktične granice stabilnosti.

U [12] su opisane mogućnosti fleksibilnijeg upravljanja elektranama uključujući upravljanje jalovom snagom, te ekonomski aspekti takvog upravljanja.

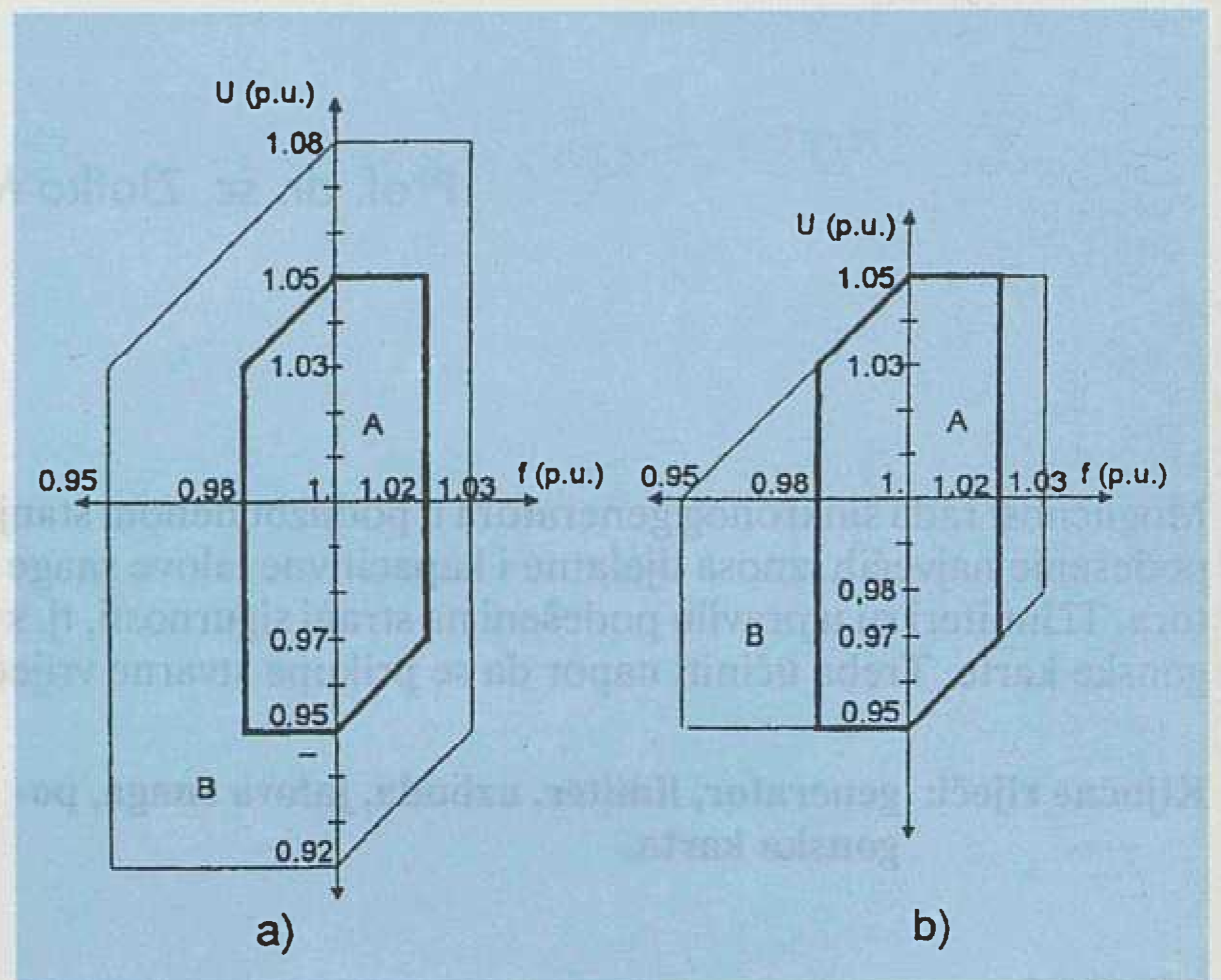
2. MOGUĆNOSTI TRAJNOG RADA GENERATORA DEFINIRANE IEC NORMAMA PRI PROMJENI NAPONA I FREKVENCije

Mogućnosti trajnog rada sinkronih strojeva definirane su IEC normama (niz normi IEC 34 - Rotacijski strojevi). Turbogenerator mora biti izveden tako da može trajno dati nazivnu snagu pri nazivnom faktoru snage uz napon $\pm 5\%$ različit od nazivnog napona i frekvenciju $\pm 2\%$ različit od nazivne frekvencije prema dijelu dijagrama koji je obuhvaćen debljom punom linijom na slici 1 (područje A). Pri tome povišenje nadtemperature (zagrijanja) ne smije biti više od približno 10 K. Turbogenerator će moći raditi i u dijelu dijagrama koji je obuhvaćen tankom linijom na slici 1b (područje B) definiranim granicama napona $\pm 5\%$ i granicama frekvencije $+3\%/-5\%$, ali uz dodatno povišenje nadtemperature. Zbog mogućeg smanjenja životnog vijeka stroja, takav rad treba ograničiti po dužini i učestalosti. Zahtjeva li se rad izvan navedenih granica napona i frekvencije, to treba definirati ugovorom [10].

Pri istodobnom povišenju napona i sniženju frekvencije, ili sniženju napona i povišenju frekvencije, nastupaju najnezgodniji uvjeti rada. Pri prvom slučaju najvjerojatnije će zagrijanje uzbude biti povišeno. Dijagram na slici 1 ograničen je u navedenim kvadrantima tako da magnetski tok stroja i bloktransformatora

ne prelazi granicu od približno $+5\%$, odnosno -5% od nazivne vrijednosti magnetskog toka.

Za ostale generatore (osim turbogenerators) zona B je prema [11] nešto proširenija po naponu tako da npr. hidrogeneratori moraju podnijeti promjene napona do $\pm 8\%$ (slika 1a, područje B), ako nije drugačije dogovoreno ugovorom.



Slika 1. Radno područje a) generatora prema IEC 34-1 i b) turbogeneratora prema IEC 34-3 pri promjeni napona i frekvencije

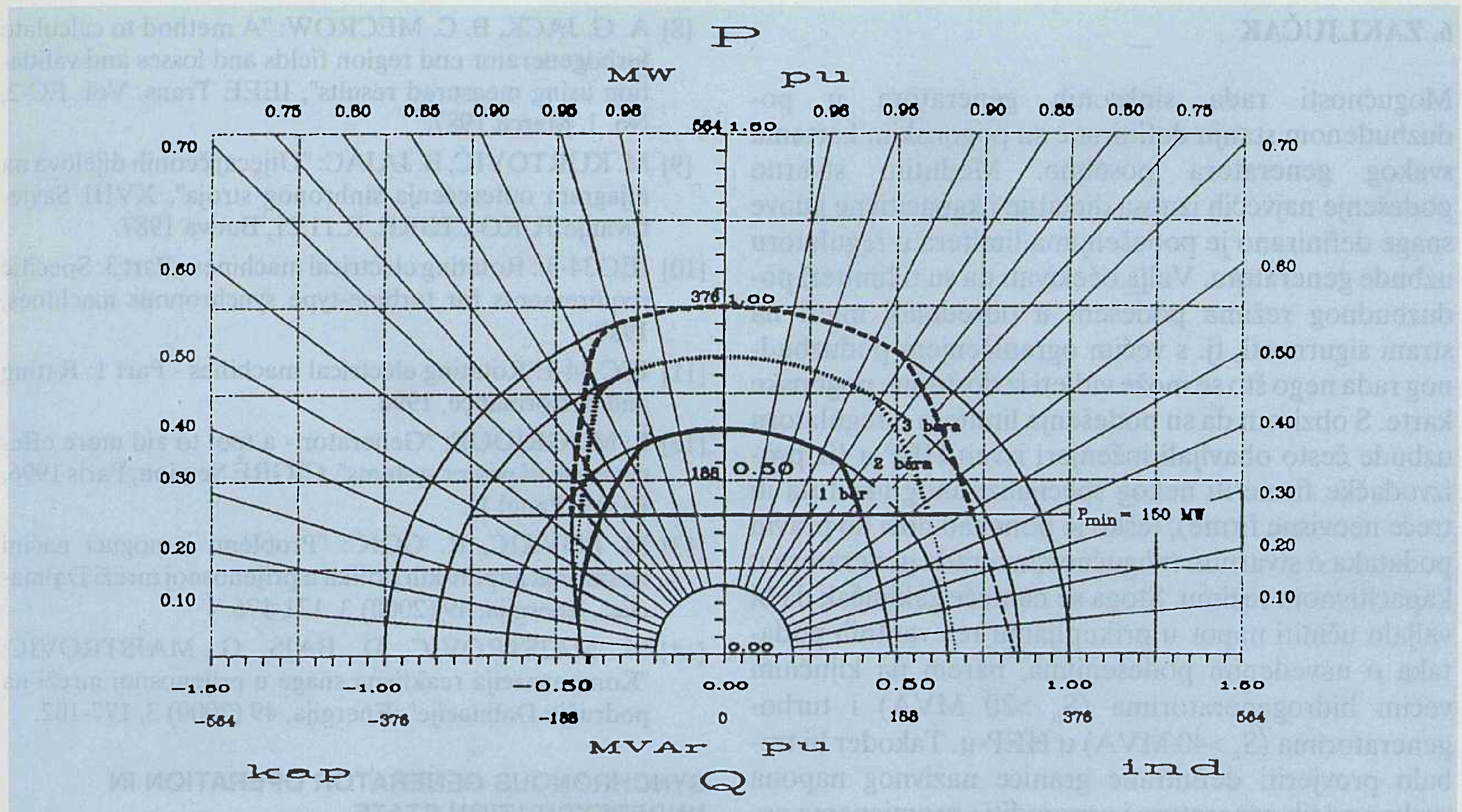
3. MJERE ZA SMANJENJE DODATNOG ZAGRIJAVANJA DIJELOVA STROJA U ČEONOM PROSTORU

Mjere za smanjenje dodatnog zagrijavanja dijelova stroja u čeonom prostoru su sljedeće:

- intenzivnije ili poboljšano hlađenje čeonog prostora,
- zamjena tlačnih ploča i tlačnih prstiju od magnetskih materijala s nemagnetskim,
- ugradnja električki vodljivih ekrana iznad steznih ploča ili između njih i krajnjih statorskih limova,
- ugradnja magnetskog prstena koji može biti ujedno i magnetski šent i mehanički držač za čeonu vezu namota,
- stupnjevit presjek krajnjih paketa limova, itd.

4. POGONSKA OGRANIČENJA U PODUZBUĐENOM STANJU TURBOGENERATORA U HEP-U

Na temelju pregleda nazivnih podataka turbogeneratora (TG) i pripadnih pogonskih karata može se uočiti raznolikost ograničenja u kapacitivnom kvadrantu dijagrama, od potpuno nedopuštenog rada (npr. TG u PTE Osijek) do izrazito dopuštenog rada, vjerojatno definiranog praktičnom granicom statičke stabilnosti (npr. TG u TE Rijeka). Primjer ograničenja radnog područja TG predložen je na slici 2 pogonskom kartom najvećeg turbogeneratora u elektranama Hrvatske elektroprivrede, TG snage 376 MVA u TE Rijeka.

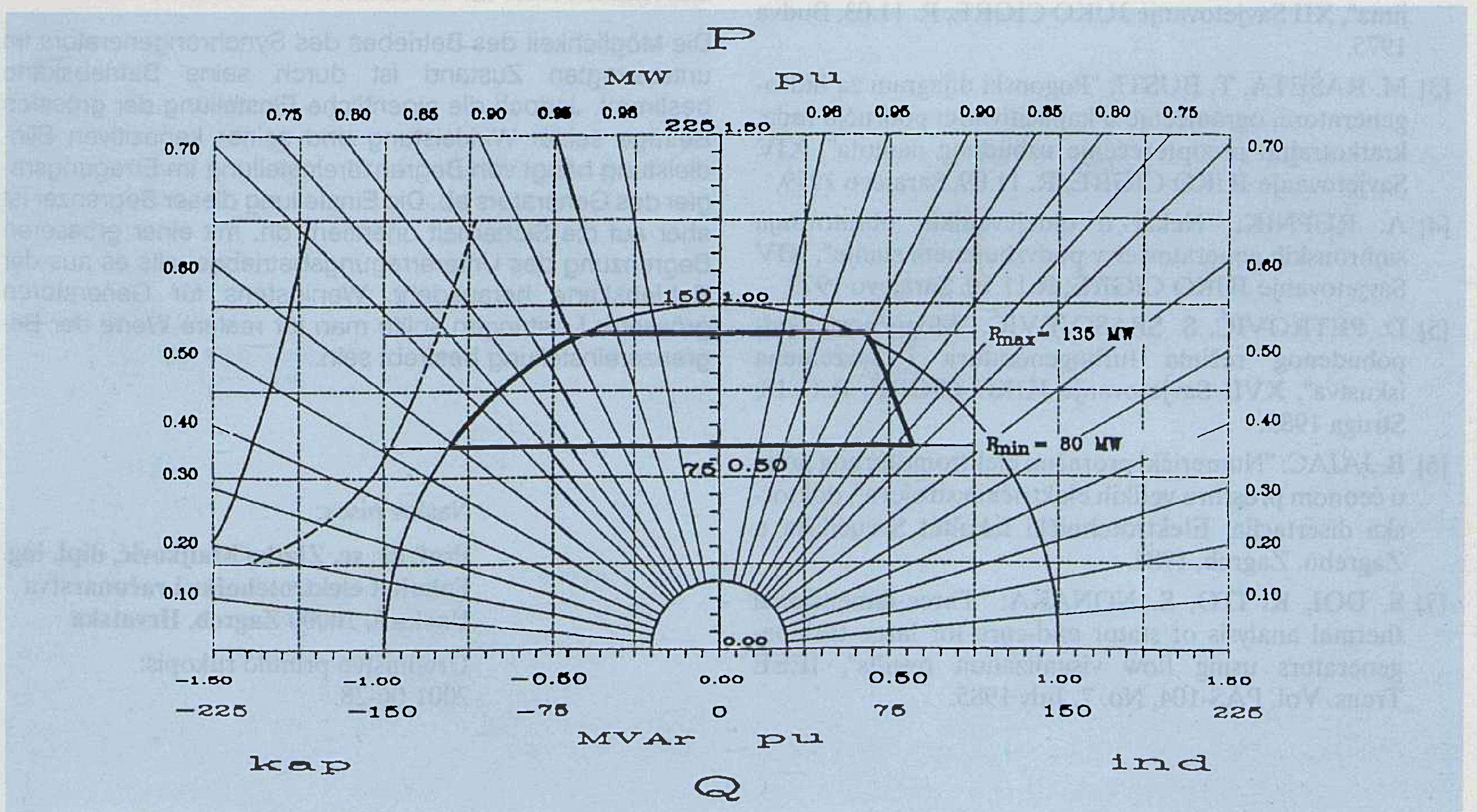


Slika 2. Pogonska karta turbogeneratorskog sistema u TE Rijeka

5. POGONSKA OGRANIČENJA U PODUZBUĐENOM STANJU HIDROGENERATORA U HEP-u

Prema očekivanjima zbog značajno manjih sinkronih reaktancija hidrogenatora (HG) u usporedbi s turbogeneratorima, zbog osiguranja statičke stabilnosti ograničenja u kapacitivnom radu hidrogenatora su blaža. No i ovdje postoje izrazite razlike dopuštenog

rada u poduzbuđenom režimu hidrogenatora ugrađenih u elektranama HEP-a, od potpuno dopuštenog (HG u HE Zakućac, HE Đale i HE Dubrovnik), do vrlo uskog radnog područja na cijevnim elektranama (HG u HE Čakovec i HE Dubrava). Za primjer tipičnih granica radnog područja HG, nacrtana je na slici 3 pogonska karta novijih hidrogenatora u HE Zakućac pojedinačne snage 150 MVA.



Slika 3. Pogonska karta hidrogenatorskog sistema br. 3 u HE Zakućac

6. ZAKLJUČAK

Mogućnosti rada sinkronih generatora u poduzbuđenom stanju definirane su pogonskim kartama svakog generatora posebno. Međutim stvarno podešenje najvećih iznosa djelatne i kapacitivne jalove snage definirano je podešenjima limitera u regulatoru uzbude generatora. Valja očekivati da su ti limiteri poduzbudnog režima podešeni u određenoj mjeri na strani sigurnosti, tj. s većim ograničenjem poduzbudnog rada nego što se može vidjeti iz dostupne pogonske karte. S obzirom da su podešenja limitera u regulatoru uzbude često obavljali inženjeri izvan HEP-a (iz proizvođačke firme ili nekog specijaliziranog instituta ili treće neovisne firme), teško je ponekad doći do pravih podataka o stvarnim mogućnostima rada generatora u kapacitivnom režimu. Stoga se nameće zaključak da bi valjalo učiniti napor u prikupljanju relevantnih podataka o navedenim podešenjima, barem na ključnim većim hidrogeneratorima ($S_n > 20$ MVA) i turbo-generatorima ($S_n > 40$ MVA) u HEP-u. Također bi trebalo provjeriti definirane granice nazivnog napona svakog od tih generatora i usporediti s promjenama napona (računskim ili mjerenim) koje se pojavljuju u mreži.

LITERATURA

- [1] W. LATEK, W. PARTYKA, A. BYTNAR: "New operating chart for large power turbogenerators", CIGRÉ Session, Paris 1990, 11-101.
- [2] Z. ČULIG, I. KURTOVIĆ, S. ŠTEFANKO: "Istraživanje elektromagnetskih i toplinskih prilika u sinhronom generatoru u posebnim pogonskim stanjima", XII Savjetovanje JUKO CIGRÉ, R. 11.03, Budva 1975.
- [3] M. RAŠETA, T. BUSTI: "Pogonski dijagram za hidrogeneratore, ograničenje u kapacitivnom području rada, kratkotrajno preopterećenje uzbudnog namota", XIV Savjetovanje JUKO CIGRÉ, R. 11.09, Sarajevo 1979.
- [4] A. RUPNIK: "Nekaj o omejevanjima obratovanja sinhronskih generatorjev v podzbuđenem stanju", XIV Savjetovanje JUKO CIGRÉ, R.11.10. Sarajevo 1979.
- [5] D. PETROVIĆ, S. SPASOJEVIĆ: "Mogućnosti poduzbudnog režima turbogeneratora i savremena iskustva", XVII Savjetovanje JUKO CIGRÉ, R.11.18, Struga 1985.
- [6] B. JAJAC: "Numerički proračun elektromotornog polja u čeonom prostoru velikih električnih strojeva", doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1984.
- [7] S. DOI, K. ITO, S. NONAKA: "Three-dimensional thermal analysis of stator end-core for large turbine-generators using flow visualization results", IEEE Trans. Vol. PAS-104, No. 7, July 1985.

- [8] A. G. JACK, B. C. MECROW: "A method to calculate turbogenerator end region fields and losses and validation using measured results", IEEE Trans. Vol. EC-2, No. 1, March 1987.
- [9] M. KURTOVIĆ, B. JAJAC: "Utjecaj čeonih dijelova na dijagram opterećenja sinhronog stroja", XVIII Savjetovanje JUKO CIGRÉ, R.11.21, Budva 1987.
- [10] IEC 34-3.: Rotating electrical machines - Part 3: Specific requirements for turbine-type synchronous machines, 1988.
- [11] IEC 34-1: Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance, 1996.
- [12] L. MOGRIDGE: "Generator - a tool to aid more effective use of power systems", CIGRÉ Session, Paris 1996, P1-03 (Panel 1).
- [13] M. LOVRIĆ, R. GOIĆ: "Problemi i mogući načini rješavanja naponskih prilika u prijenosnoj mreži Dalmacije", Energija, 49 (2000) 3, 171-176.
- [14] M. MAJSTROVIĆ, D. BAJŠ, G. MAJSTROVIĆ: "Kompenzacija reaktivne snage u prijenosnoj mreži na području Dalmacije", Energija, 49 (2000) 3, 177-182.

SYNCHRONOUS GENERATOR OPERATION IN UNDEREXCITATION STATE

Possibility of synchronous generator operation in an underexcitation state is defined by generator's performance chart. In fact, real values of the highest values of active and reactive power are defined by a limiter situated in the excitation regulator. These limiters are usually regulated on the security side that is with higher boundary of underexcitation operation than visible from the performance chart. It is necessary to collect real values of limiter regulation, at least for bigger generators.

DIE BETRIEBSMÖGLICHKEITEN VON SYNCHRON-GENERATOREN IM UNTERERREGTEN ZUSTAND

Die Möglichkeit des Betriebes des Synchrongenerators im untererregten Zustand ist durch seine Betriebskarte bestimmt. Jedoch die eigentliche Einstellung der grössten Beträge seiner Wirkleistung und seiner kapazitiven Blindleistung hängt von Begrenzereinstellung im Erregungsregler des Generators ab. Die Einstellung dieser Begrenzer ist eher auf die Sicherheit orientiert, dh. mit einer grösseren Begrenzung des Untererregungsbetriebes, als es aus der Betriebskarte herausgeht. Wenigstens für Generatoren grösserer Leistungen sollte man für realere Werte der Begrenzereinstellung bestrebt sein.

Naslov pisca:

Prof. dr. sc. Zlatko Maljković, dipl. ing.
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Unska 3, 10000 Zagreb, Hrvatska

Uredništvo primilo rukopis:
2001-06-28.