

## Sinchroninių elektros mašinų reguliavimo ir V charakteristikų savybės

P. Kostrauskas, A. Kalvaitis, L. Andriušienė

Elektros sistemų katedra, Kauno technologijos universitetas,  
Studentų g. 48, LT-51367 Kaunas, Lietuva, tel. +370 37 351318

### Ivadas

Sinchroninių elektros mašinų savybes reglamentuoja jų charakteristikos. Dirbant sinchroninei mašinai lygiagrečiuoju režimu su galingu elektros energijos tinklu, viena iš svarbiausių charakteristikų yra V charakteristika. Šios charakteristikos savybės plačiai aptartos [1] ir įrodyta, kad bendruoju atveju V charakteristikos analiziškai aprašomos hiperbolių lygtimis, kurių centrai ir ašys priklauso nuo sinchroninės mašinos inkaro aktyviosios ir induktyviosios varžos bei įtampos vertės. Taip pat įrodyta, kad didelės galios sinchroninei mašinai ( $R=0$ ) dirbant kompensatoriaus režimu, V charakteristikos analiziškai aprašomos tiesių lygtimis (tariama, kad sinchroninė mašina neįsotinta). Išvedant sinchroninės mašinos reguliavimo charakteristikas [2], įrodyta, kad reguliavimo charakteristikų šeima analiziškai aprašoma hiperbolių lygtimis, kurių parametrai priklauso nuo inkaro aktyviosios ir sinchroninės induktyviosios varžos bei gnybtų įtampos. Šio darbo tikslas – aptarti sinchroninės mašinos reguliavimo ir V charakteristikų bendras savybes.

### Reguliavimo charakteristikos lygtys

Tirsime neryškiapolę neįsotintą sinchroninę mašiną, dirbančią autonominiu režimu, kai:

- inkaro fazės įtampa  $U = const$ ,
- galios koeficientas  $\cos \varphi = const$ ,
- inkaro induktyvioji fazės varža  $X_a = const$ ,
- inkaro sklaidos induktyvioji fazės varža  $X_{a\sigma} = const$ .

Kadangi sinchroninės mašinos magnetinė sistema neįsotinta, tai inkaro fazės elektrovara  $E_a$  proporcinga žadinimo srovei  $I_f$ :

$$E_a = kI_f; \quad (1)$$

čia  $k$  – proporcingumo koeficientas.

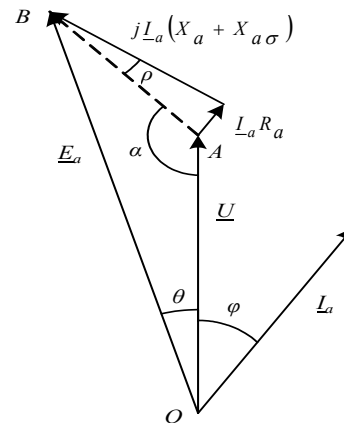
Iš 1 paveikslą gauname:

$$OB^2 = OA^2 + AB^2 - 2 \cdot OA \cdot AB \cdot \cos \alpha; \quad (2)$$

čia  $OB = E_a$ ;  $OA = U$ ;  $AB = I_a \sqrt{R_a^2 + X^2}$ ;  $R_a$  – inkaro apvijos aktyvioji fazės varža;  $X = X_a + X_{a\sigma}$  – inkaro sinchroninė induktyvioji varža;

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + \rho + \varphi;$$

$$\rho = \arctan \frac{R_a}{X}.$$



1 pav. Neryškiapolės sinchroninės mašinos vektorių diagrama

Irašę čia pateiktas išraiškas į (2) lygtį, gauname:

$$E_a^2 = U^2 + I_a^2 (R_a^2 + X^2) + 2UI_a \sqrt{R_a^2 + X^2} \sin(\rho + \varphi), \quad (3)$$

arba

$$E_a^2 = U^2 + I_a^2 (R_a^2 + X^2) + 2UI_a (R_a \cos \varphi + X \sin \varphi). \quad (4)$$

(4) funkcijos  $E_a$  ekstremumas srovės  $I_a$  atžvilgiu:

$$I_{akr} = -\frac{U(R_a \cos \varphi + X \sin \varphi)}{R_a^2 + X^2}. \quad (5)$$

Irašę šią kritinės srovės išraišką į (4) lygtį ir įvertinę (1) priklausomybę, gauname žadinimo srovės minimumą:

$$I_{f \min} = \frac{U |R_a \sin \varphi - X \cos \varphi|}{k \sqrt{R_a^2 + X^2}}. \quad (6)$$

Pašalinę iš (5) ir (6) lygčių parametą  $\varphi$ , gauname:

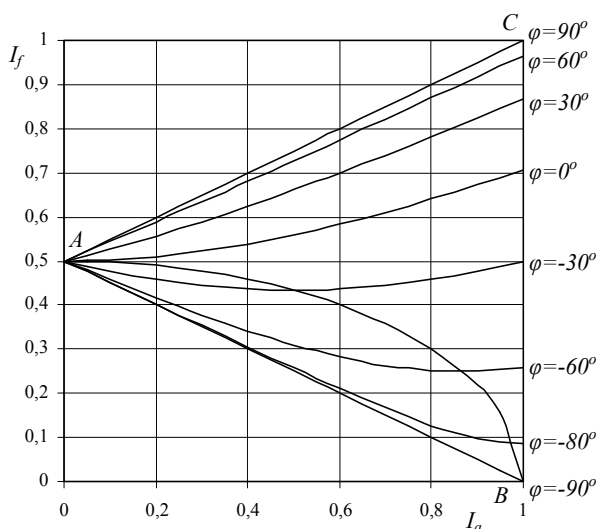
$$\frac{I_{akr}^2}{\left(\frac{U}{\sqrt{R_a^2 + X^2}}\right)^2} + \frac{I_{f \min}^2}{\left(\frac{U}{k}\right)^2} = 1. \quad (7)$$

Iš (7) lygties išplaukia, kad inkaro srovės kritinės vertės  $I_{akr}$ , esant minimalioms žadinimo srovėms  $I_{f \min}$ , sutampa su elipsės (7) taškais.

(4) lygtį galima transformuoti taip:

$$\frac{I_f^2}{\left[\frac{U}{k} \cos(\rho + \varphi)\right]^2} - \frac{\left[I_a + \frac{U}{\sqrt{R_a^2 + X^2}} \sin(\rho + \varphi)\right]^2}{\left[\frac{U}{\sqrt{R_a^2 + X^2}} \cos(\rho + \varphi)\right]^2} = 1. \quad (8)$$

(8) hiperbolės pusašių ilgiai bei viršūnių koordinatės priklauso nuo kampo  $\varphi$ ; tuo tarpu (7) elipsės visi parametrai (pusašių ilgiai ir viršūnių koordinatės) yra pastovūs.



2 pav. Reguliavimo charakteristikų šeima, esant skirtingiems kampams  $\varphi$

2 paveiksle pateikti (7) ir (8) funkcijų grafikai. Koordinačių ašyse srovės  $I_a$  ir  $I_f$  išreikštos santykiniais vienetais:  $AB$  – elipsės (7) lankas. Visų hiperbolių viršūnės sutampa su elipsės  $AB$  lanko taškais. Hiperbolių šakos atitinka sąlygą  $\varphi = const$ .  $\varphi > 0$  atitinka nuo įtampos  $\underline{U}$  atsiliekančią inkaro fazės srovę,  $\varphi < 0$  – įtampą  $\underline{U}$  pralenkiančią inkaro fazės srovę. Taško  $A$  ordinatė  $I_{f \min} = \frac{U}{k}$  priklauso nuo sinchroninės mašinos tuščiosios veikos charakteristikos krypties koeficiento  $k$ .

Didelės galios sinchroninis kompensatorius tenkina sąlygą

$$\rho + \varphi \approx 90^\circ. \quad (9)$$

Įrašius šią išraišką į (8) lygtį, gaunama:

$$I_f k - I_a X - U = 0. \quad (10)$$

(10) funkcijos grafikas pavaizduotas tiese  $AC$  (2 pav.). Taško  $C$  koordinatės  $I_a = 1$ ;  $I_f = 1$ . Tai išplaukia iš (3) lygties, kai:  $R_a = 0$ ;  $k = 2$ ;  $\rho + \varphi = 90^\circ$  (kadangi  $R_a = 0$ , tai  $\rho = 0$ ).

Tiesės  $AB$  lygtis gaunama iš (3) lygties, kai  $R_a = 0$ ;  $\rho + \varphi = -90^\circ$ :

$$I_f k + I_a X - U = 0. \quad (11)$$

## V charakteristikos lygtys

Įrodyta [1], kad neįsotintos sinchroninės mašinos V charakteristika bendruoju atveju išreiškiama hiperbolės lygtimi:

$$\frac{E^2}{U^2 R_a^2} - \frac{(I_a (R_a^2 + X^2) \pm UX)^2}{U^2 R_a^2} = 1. \quad (12)$$

Taip pat įrodyta [1], kad tai reguliavimo charakteristikos šaka, kai  $\cos \varphi = 0$ .

Kai  $R_a = 0$  ir  $P = 0$ , V charakteristikų lygtys tokios [1]:

dešinioji šaka

$$I_a = \frac{E}{X} - \frac{U}{X}; \quad (13)$$

kairioji šaka

$$I_a = -\frac{E}{X} + \frac{U}{X}. \quad (14)$$

Akivaizdu, kad (13) ir (10) bei (14) ir (11) lygtys yra tapačios.

Taigi, dirbant neryškiapolei neįsotintai sinchroninei mašinai kompensatoriaus režimu, kai  $R_a = 0$  ir  $P = 0$ , V charakteristikos sutampa su reguliavimo charakteristika, kai  $\cos \varphi = 0$ .

Išvestos didelės galios sinchroninio kompensatoriaus V charakteristikos lygtys (13) ir (14), aprašančios inkaro srovės priklausomybę nuo žadinimo srovės. Tai pagrindinės sinchroninio kompensatoriaus eksploatacinės charakteristikos, įgalinančios įvertinti į tinklą generuojamą reaktyviąją galią. Kaip žinome, sinchroninės mašinos reguliavimo charakteristika taip pat aprašo inkaro srovės priklausomybę nuo žadinimo srovės, dirbant autonominiu režimu, kai  $U = const$  ir  $\cos \varphi = const$ . Iš čia išplaukia, kad didelės galios sinchroninės mašinos V charakteristikos sutampa su reguliavimo charakteristika, kai  $P = 0$  ir  $\cos \varphi = 0$ .

## Eksperimentinė dalis

Eksperimentas atliktas su ryškiapole sinchronine mašina [1]:  $P_N = 5000 \text{ W}$ ;  $U_N = 400 \text{ V}$ ;  $I_N = 7,22 \text{ A}$ ;  $X_d = 8,75 \Omega$ ;  $X_q = 5,58 \Omega$ ;  $R_a = 0,480 \Omega$ ;  $m_1 = 3$ ;

**Lentelė. Matavimų ir skaičiavimų rezultatai**

Inkaro srovė $I_a$ , A		0,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00
Elektro- vara $E$ , V	Matuota	231	237	238	241	243	244	246
	Skaičiuota	230	235	236	239	241	242	242
Matavimų ir skaičiavimų procentinė paklaida		0,43	0,85	0,85	0,84	0,83	0,83	1,24

$2p = 4$ . Synchroninės mašinos velenas neapkrautas (tuščioji veika); skaičiavimui pasinaudota (12) formulė;

laikoma, kad  $X = \frac{X_d + X_q}{2}$ .

Ekspimento ir skaičiavimo rezultatai pateikti lentelėje.

Iš lentelės išplaukia, kad skaičiavimų ir matavimų procentinės paklaidos neviršija leistinų.

### Išvados

1 Įrodyta, kad synchroninės mašinos reguliavimo charakteristikos lygtys bendruoju atveju aprašomos hiperbolės lygtimis.

2 Didelės galios sinchroninių mašinų, dirbančių  $P = 0$ ;  $\cos \varphi = 0$ ;  $R_a = 0$  režimu, reguliavimo ir  $V$  charakteristikos sutampa; jos gali viena kitą pakeisti.

3 Pateiktos teorijos teisingumą ir tikslumą įrodė atliktas eksperimentas.

### Literatūra

1. **Kostrauskas P., Ugenskis A., Kalvaitis A.** Neįsotintosios sinchroninės mašinos  $V$  charakteristikos // Elektronika ir elektrotechnika.–Kaunas: Technologija, 1995.–Nr.1.–P.39–42.
2. **Kostrauskas P., Andriušienė L.** Regulierkennlinie eines vollpoligen Synchrongenerators // Proceedings of the International Conference “Electrical Machines in Electrical Power Industry” SME’99, 14–16 June, 1999. – Kazimiež Dolny, Poland: Politechnika Warszawska.– P. 37–42.
3. **Вольдек И. А.** Электрические машины. – Ленинград: Энергия, 1978. – 832с.
4. **Копылов И. П.** Электрические машины. – Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 360с.
5. **Иванов – Смоленский А. В.** Электрические машины. – Москва: Энергия, 1980. – 926с.

Pateikta spaudai 2005 02 08

### **P. Kostrauskas, A. Kalvaitis, L. Andriušienė. Sinchroninių elektros mašinų reguliavimo ir $V$ charakteristikų savybės // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2005. – Nr. 4 (60). – P. 50–52.**

Sinchroninės elektros mašinos reguliavimo charakteristika nusako mašinos žadinimo srovės priklausomybę nuo apkrovos srovės, kai mašina dirba autonominiu režimu, o inkaro gnybtų įtampa, galios koeficientas ir dažnis yra pastovūs. Šiandien reguliavimo charakteristika sudaroma eksperimentiniu būdu. Straipsnyje pateiktos reguliavimo charakteristikų analizinės išraiškos – tai hiperbolės, kurių viršūnių taškų geometrinė vieta aprašoma elipse. Sinchroninei mašinai dirbant tuščiosios veikos režimu, kai inkaro apvijos aktyvioji varža lygi nuliui, reguliavimo charakteristika analiziškai aprašoma dviejų tiesinių funkcijų lygtimis. Šių tiesių susikirtimo taško ordinatė lygi žadinimo srovės nulinei vertei. Įrodyta, kad neįsotintos sinchroninės elektros mašinos  $V$  charakteristika (lygiagretus režimas) sutampa su reguliavimo charakteristika (autonominis režimas), jeigu elektromagnetinė galia ir galios koeficientas lygūs nuliui, o inkaro apvijos varža irgi lygi nuliui. Pagrindinės teorinės prielaidos patvirtintos eksperimentu ir pateiktos jų praktinio taikymo galimybės. Il. 2, bibl. 5 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų ir rusų k.).

### **P. Kostrauskas, A. Kalvaitis, L. Andriušienė. The Feature of Regulating and $V$ -characteristics of Synchronous Electrical Machines // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2005. – No. 4(60) – P. 50–52.**

There is known that regulating characteristic of synchronous electrical machine specifies the dependence of excitation current on the load current, when duty is off - line and voltage at armature terminals, load factor and frequency are constant. Nowadays regulating characteristic is obtained by experimental way. The paper presents analysis expressions of regulating characteristics – that is hyperbolas witch locus of vertices is described by ellipsis. Under the no-load conditions of synchronous machine the active resistance of armature winding is equal zero, and regulating characteristic is described by equations of two concurrent lines. The ordinate of these straight junction is equal zero value of excitation current. The paper presents that when electromagnetic power and power factor are equal zero and active resistance of armature winding is equal zero,  $V$ -characteristic (parallel duty) coincides with regulating characteristic (off-line duty). The main theoretical presumptions have been tested experimentally and offered a suggestion of practical application. Ill. 2, bibl. 5 (in Lithuanian, summaries in Lithuanian, English and Russian).

### **П. Костраускас, А. Калвайтис, Л. Андрушене. Свойства регулировочных и $V$ -образных характеристик синхронных электрических машин // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2005. – № 4(60). – С. 50–52.**

Регулировочная характеристика синхронной электрической машины определяет зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при постоянстве напряжения на зажимах машины, постоянстве коэффициента мощности, постоянстве частоты при работе в автономном режиме. На сегодняшний день регулировочная характеристика синхронной машины определяется экспериментально. Представлены аналитические зависимости регулировочных характеристик; они представляют гиперболы, геометрическое место точек вершин которых находится на эллипсе. При работе в холостом ходу и при сопротивлении обмотки якоря равном нулю регулировочная характеристика описывается двумя пересекающимися прямыми, ордината точки пересечения которых равна нулевому значению тока возбуждения. Доказано, что  $V$ -образная характеристика ненасыщенной синхронной неявнополюсной машины при нулевой электромагнитной мощности и сопротивлении обмотки якоря равном нулю совпадает с регулировочной характеристикой той же синхронной машины, работающей в режиме холостого хода при коэффициенте мощности равном нулю. Проведенный эксперимент подтвердил достоверность основных теоретических положений, а так же возможность практического применения предложенных теоретических положений. Ил. 2, библи. 5 (на литовском языке; рефераты на литовском, английском и русском яз.).

DOI: 10.5755/j02.eie.10419