فصل سوم

مدار معادل اجزاي سيستم هاى قدرت

مقدمه

اجزاي سيستمهاي قدرت :ژنراتورها، ترانسفورماتورها، خطوط انتقال (هوايي وكابل)، خازن هاي سري و موازي، بارها (روشنايي وگرمايشي)، كنترل كننده هاي اندازه و فاز ولتاژ.

تعيين مدل هر كدام از سيستمهاي قدرت ما را در مدل سازي كل سيستم كمك مي نمايد.

ماشين هاى سنكرون (ژنراتور و موتور)

- قطب برجسته: مناسب براي توربين هاي كه با سرعت نسبتا كم و سيار، تعداد قطبهاي زيادي براي توليد ولتاژ با فركانس ۵۰ هرتز دارند.
- قطب صاف يا استوانه اي: مناسب توربين هاي بخار يا گازي با سرعت زياد.

كلمه سنكرون = ژنراتور تحت شرايط پايدار يا ماندگار (Steady-State) در سرعت و فركانس ثابتي كار مي كند.

ماشين سنكرون : دو قطبي - چهار قطبي . . .

يك ماشين سنكرون دوقطبي بايد ۳۰۰۰ دور بر دقيقه سرعت داشته باشد تا ولتاژي با فركانس ۵۰ هرتز توليد كند.

$$f = \frac{p}{2} \times \frac{n}{60} \quad [\text{Hz}]$$

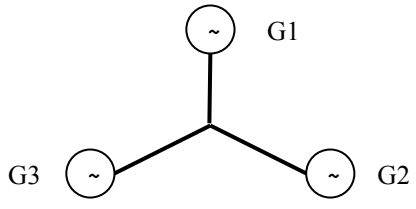
p تعداد قطب ها و n سرعت روتور برحسب دور بر دقيقه (r.p.m.)

در ماشين دو قطبي $p = 2$ دوران زاويه مكانيكي روتور با زاويه الكتريكي روتور برابراست.

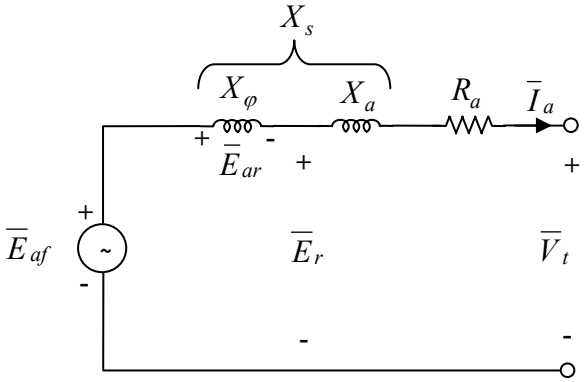
در ماشين چهار قطبي $p = 4$ اگر روتور ۱۸۰ درجه دوران كند، يك سيكل كامل براي ولتاژ القا شده حاصل مي شود كه معادل ۳۶۰ درجه الكتريكي است.

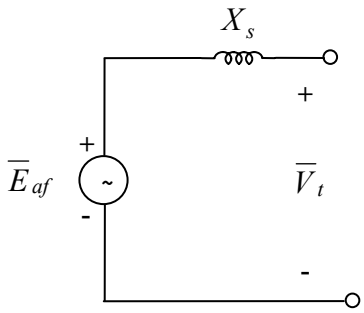
زاويه مكانيكي روتور $\leftarrow \theta_e = \frac{p}{2}\theta_m \rightarrow$ زاويه الكتريكي ولتاژ القا شده

ماشين واقعي: مدل ماشين سنكرون با در نظر گرفتن تلفات الكتريكي، مكانيكي، شار نشتي و راكتانس غير خطي آهن



www.jozve.org





X_φ : راكتانس القايي جهت نمايش تاثير عكس العمل آرميچر يا راكتانس مغناطيس كننده ماشين

$\overline{E}_{af}$: ولتاژ القايي بي باري ژنراتور

$\overline{E}_r$: ولتاژ القايي تكفاز در اثر شار مغناطيسي در فاصله هوايي

R_a : مقاومت سيم پيچي آرميچر

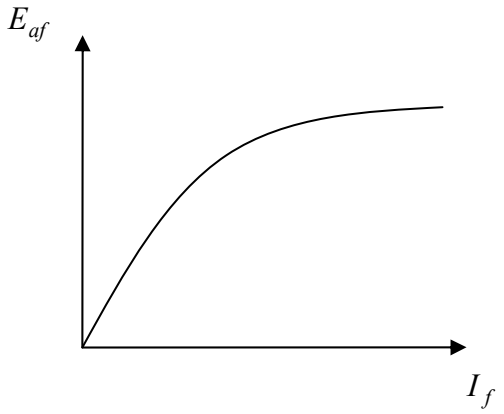
X_a : راكتانس پراكندگي آرميچر در اثر شار نشتي آرميچر توسط جريان I_a

$\overline{V}_t$: ولتاژ ترمينال دو سر ژنراتور (تكفاز)

$X_a + X_\varphi = X_s$: راكتانس سنكرون

$R_a + jX_s = \overline{Z}_s$: امپدانس سنكرون

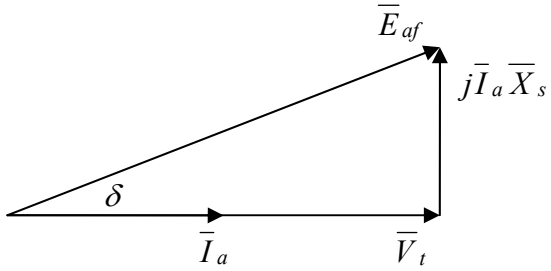
$E_{af} \propto I_f \leftarrow$ جريان تحريك



www.jozve.org

$\delta = \angle(\overline{E}_{af}, \overline{V}_t) \rightarrow$ زاويه (بار) ماشين سنكرون

$$\overline{V}_t = \overline{E}_r - \overline{I}_a(R_a + jX_a)$$
$$\overline{V}_t = \overline{E}_{af} - \overline{I}_a[R_a + j(X_a + X_\varphi)]$$
$$\overline{V}_t = \overline{E}_{af} - \overline{I}_a(R_a + jX_s)$$
$$\overline{V}_t = \overline{E}_{af} - \overline{I}_a\overline{Z}_s$$
$$R_a << X_S \Rightarrow \overline{Z}_s = jX_s$$
$$\overline{V}_t = \overline{E}_{af} - j\overline{I}_a X_s \quad \text{(Synchronous Generator)}$$
$$\overline{V}_t = \overline{E}_{af} + j\overline{I}_a X_s \quad \text{(Synchronous Motor)}$$



تحريك عادي حالت مقاومتي

در حالت ماندگار (پايدار) Steady – State راكتانس سنكرون X_s

در حالت گذرا (اتصال كوتاه) Transient راكتانس گذرا X'_s

در حالت زيرگذرا (اتصال كوتاه) Subtransient راكتانس زيرگذرا X''_s

ژنراتورها و موتورهاي سنكرون برحسب تغييرات جريان تحريك مي توانند در حالات زير كار كنند:

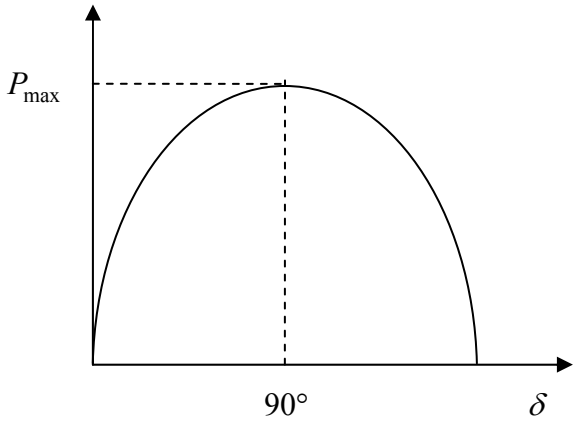
١. تحريك عادي
٢. فوق تحريك
٣. زير تحريك

$$\begin{cases}\overline{V}_t = V_t\angle 0^\circ \\ \overline{E}_{af} = E_{af}\angle\delta\end{cases} \Rightarrow \delta = \angle(\overline{E}_{af}, \overline{V}_t) \rightarrow \overline{I}_a = \frac{E_{af}\angle\delta - V_t\angle 0^\circ}{jX_s}$$

$$P = \frac{V_t E_{af}}{X_s}\sin\delta$$

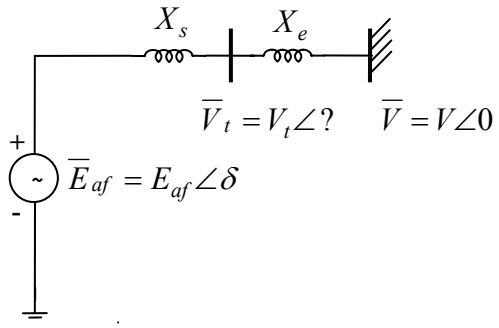
$$Q = \frac{{E_{af}}^2 - V_t E_{af}\cos\delta}{X_s}$$

www.jozve.org



حداکثر قدرت ژنراتور سنکرون $\rightarrow \delta = 90 \;\Rightarrow\; P_{\max} = \dfrac{V_t E_{af}}{X_s}$

اتصال ژنراتور سنکرون به شین بینهایت



$$\begin{cases} \delta = \angle(\overline{E}_{af}, \overline{V}_t) \\ P = \dfrac{E_{af} V_t}{X_s} \sin\delta \\ Q = \dfrac{{E_{af}}^2 - E_{af} V \cos\delta}{X_s} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \delta' = \angle(\overline{E}_{af}, \overline{V}) \\ P' = \dfrac{E_{af} V}{X} \sin\delta' \\ Q' = \dfrac{{E_{af}}^2 - E_{af} V \cos\delta'}{X} \\ X = X_s + X_e \end{cases}$$

براي حل كامل ژنراتور ۱۱معادله ديفرانسيلي بايد بطور همزمان حل شوند. ولي معمولا از همه آنها فقط يكي را در نظر گرفته و حل مي كنند و از R هم صرف نظر مي شود.

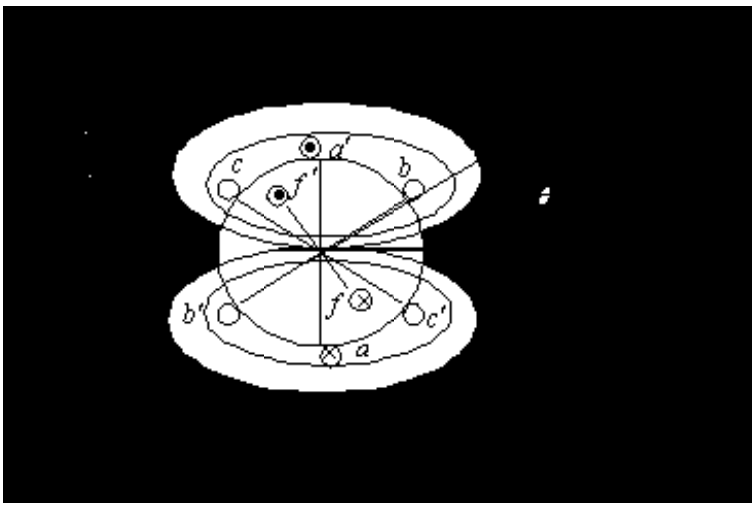
www.jozve.org

ماشين سنكرون با روتور استوانه اي

ولتاژ توليد شده (القا شده)

- سيم پيچي يكسان و متمركز در استاتور، بطور متقارن با فاصله مكاني ۱۲۰درجه در اطراف سيم پيچي متمركز در روتور قرار گرفته اند.
- اما در ماشينهاي واقعي ،سيم پيچ هاي استاتور و روتور به اشكال گوناگون توزيع شده ا ند.
- محاسبات براساس تعداد دورهاي موثر سيم پيچي ها روي گامها توزيع شده و يا گامهاي كوتاه اصلاح شده می باشد.
- MMF مكاني يا شار بصورت سينوسي است.

سطح مقطع ماشين سنكرون روتور استوانه اي



هرگاه تعداد موثر سيم پيچ ميدان N_f و جريان DC ميدان I_f در آنصورت مقدار نيوی محركه مغناطيسی ميدان برابر است با:

$$MMF_f = N_f I_f$$

- هر سيم پيچ به اندازه ۱۸۰در جه در فضا گسترده شده و در نتيجه تعداد قطب ها ي ماشين $p = 2$ است.
- با چشم پوشي از مقاومت مغناطيسي آهن و توزيع سينوسي فضايي، شار ايجاد شده در فاصله هوايي ماشين بوسيله MMF_f موتور برابر است با:

$$\phi_f = \phi_{fm} \cos\theta$$

$$\phi_{fm} = MMF_f \times \rho = \frac{MMF_f}{\Re}$$

θ : زاويه فضايي اندازه گيري شده از محور روتور

$\rho = \frac{1}{\Re}$ هدايت مغناطيسي فاصله هوايي

اگر روتور در جهت مثلثاتي و با سرعت مكانيكي n_s دور بر دقيقه بچرخد [rad/sec] $\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60}$ ، پس موقعيت محور در هر لحظه برابر است با $\theta = \omega_s t$

سيم پيچي هاي استاتور، شار گردان را با سرعت ω_s قطع مي كنند در نتيجه ولتاژ القا شده در فاز a برابر است با:

www.jozve.org

$$e_a = -N_s \frac{d\phi_f}{dt} = 2\pi f N_s \phi_{fm} \sin \omega t$$
$$E_a = 4.44 f N_s \phi_{fm}$$

N_s : تعداد دور سيم پيچهادر هر فاز استاتور

$f = \frac{\omega_s}{2\pi}$: فركانس ولتاژ موثر اندازگيري شده در ترمينال سيم پيچي a

هرگاه سيستم متعادل با ولتاژ هاي سه فاز با توالي abc (توالي مثبت) بصورت زير را در نظر بگيريم:

$$\overline{E}_a = E_a \angle 0°$$
$$\overline{E}_b = E_b \angle -120°$$
$$\overline{E}_c = E_c \angle -240° = E_c \angle +120°$$

وقتي روتور در جهت مخالف چرخانده شود ترتيب فازها acb (توالي منفي) خواهد بود.
درماشين دو قطبي $p = 2$ زواياي مكانيكي والكتريكي برابر هستند.

$$\theta_e = \frac{p}{2}\theta_m \quad , \quad \omega_e = \frac{p}{2}\omega_m$$

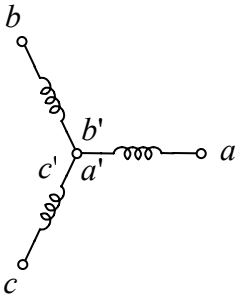
$$f = (\frac{\omega_s}{2\pi})\frac{p}{2} = p\frac{\omega_s}{4\pi}$$

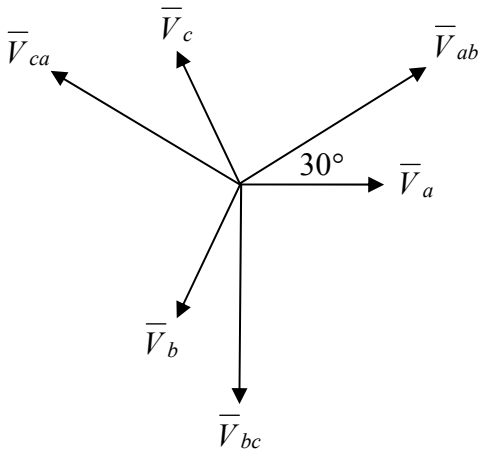
$$\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} = \frac{4\pi f}{p} \quad [\text{rad}_{\text{mech}}/\text{sec}]$$

نيروی محركه مغناطيسی (MMF) چرخشي

هرگاه فرض كنيم سيم پيچي روتور باز باشد $(I_f = 0)$ و سيم پيچي هاي استاتور ژنراتور بصورت ستاره Y متصل شده وبه يك منبع سه فاز متعادل با جريان های زير متصل باشد.

$$i_a(t) = I_m \sin \omega t$$
$$i_b(t) = I_m \sin(\omega t - 120)$$
$$i_c(t) = I_m \sin(\omega t + 120)$$





دياگرام فازوري سيستم وسرهاي ترمينال ژنراتور براي اتصال ستاره

www.jozve.org

دياگرام فازوري سيستم وسرهاي ترمينال ژنراتور براي اتصال مثلث

اين جريانها مجموعه متعادلي با توالي مثبت هستند.
در اين صورت MMF ايجاد شده توسط هر حلقه استاتور دريك MMF پالسي در حول محور خود خواهد بود .

$$MMF_a(t) = N_a i(t) = N_s I_m \sin \omega t$$
$$MMF_b(t) = N_b i(t) = N_s I_m \sin(\omega t - 120°)$$
$$MMF_c(t) = N_c i(t) = N_s I_m \sin(\omega t + 120°)$$

بنابراين MMF كل استاتور (آرميچر) به صورت تابعي از t و زاويه فضايي θ برابر است با:

$$MMF_{3\,phase}(\theta,t) = MMF_a(t)\cos\theta + MMF_b(t)\cos(\theta - 120) + MMF_c(t)\cos(\theta + 120)$$
$$MMF_{3\,phase}(\theta,t) = 1.5F_m \sin(\theta - \omega t) \quad [\text{AmpereTurn/Pole}]$$

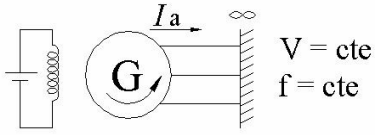
كه درآن $F_m = N_m I_m$ حداكثر مقدار MMF براي هر فاز است. MMF استاتور يك MMF چرخشي است كه سرعت آن براساس رابطه $f = (\frac{\omega_s}{2\pi})(\frac{p}{2}) = p\frac{\omega_s}{4\pi}$ با فركانس f و ولتاژ اعمال شده مشخص مي شود.

جهت چرخش اين MMF با علامت ω در رابطه مشخص شده وهنگامي كه توالي فاز ولتاژ اعمال شده در رابطه جريان ها معكوس شود. جهت چرخش MMF نيز معكوس خواهد شد.

ماشين ايده آل

در مدل ماشين ايده آل (خطي) تمامي تلفات الكتريكي و مكانيكي و فلوي نشتي سيم پيچها و مقاومت مغناطيسي آهن صرفنظرمی شود. چون مدار سه فاز متعادل است لذا از مدل هاي تك فاز مي توان استفاده نمود، (توالي بارها $\xrightarrow[abc]{}$).

برای سادگی فرض می شود ژنراتور به شین بی نهایت متصل باشد. دراین حالت ژنراتور طوري راه اندازي مي شود كه ولتاژ دو سر هر فاز (مثلا a) برابر با ولتاژ ترمينال و شين بي نهايت باشد.



چرخش روتور با سرعت ω .

شكل(۱-۳)

www.jozve.org

در حالت سنکرونیزاسیون مناسب: $E_a = 4.44 f N_s \phi_{fm} \rightarrow (= V_t)$

درحالت بي باري $V_t = E_a$ می باشد که چون این ولتاژ ناشي از القاي سيم پيچ تحريك است آن را با E_{af} نمايش مي دهيم پس $V_t = E_{af}$.

MMF_r نیروی محرکه مغناطیسی منتجه یا برآیند $MMF_r = MMF_f + MMF_{3phase}$

$\overline{E}_r$: ولتاژ منتجه (القا شده توسط MMF_r)

$\overline{E}_{af}$: ولتاژ تحريك در استاتور (القا شده توسط MMF_f)

$\overline{E}_{ar} = j\overline{I}_a X_\varphi$: افت ولتاژعكس العمل آرميچر

X_φ : راكتانس عكس العمل آرميچر(القايي)

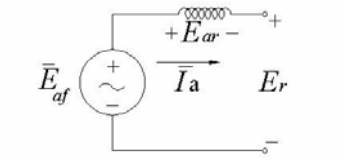
T : گشتاور الكترومكانيكي

P : توان (تبديل شده) الكترومكانيكي

در حالت بي باري ولتاژ ترمينال $\overline{V}_t$ با ولتاژ منتجه $\overline{E}_r$ و ولتاژ تحريك در استاتور $\overline{E}_{af}$ برابر است

$$\xrightarrow{\overline{V}_t = \overline{E}_r = \overline{E}_{af}} \overline{I}_a = 0$$

در حالت بارداري ولتاژ ترمينال $\overline{V}_t$ با نيروي محركه منتجه $\overline{E}_r$ برابر است ($\overline{V}_t = \overline{E}_r$). چون درشين بي نهايت $\overline{V}_t = \text{cte}$ ثابت است پس $\overline{V}_t = \overline{E}_r$ نيز ثابت بوده و آنگاه MMF_r نيز ثابت خواهد بود.



مدل ماشین سنکرون روتور استوانه ای
سه فاز (برای هر فاز)

شكل(۲-۳)

در اين حالت فرض می شود گشتاور محور $T=0$ باشد و جريان $\overline{I}_f$ از حالت بي باري افزايش يابد. تفاضل بين MMF ها بايستي توسط جريان I_a و نيروي محركه مغناطيسي MMF_{3phase} تامين شود.

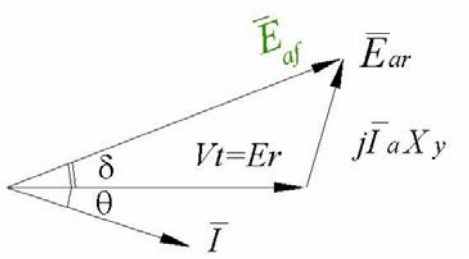
$I_f \uparrow$ افزايش جريان تحريك $\Rightarrow MMF_f \rangle MMF_r \Rightarrow MMF_{3phase} = MMF_r - MMF_f$

$I_f \uparrow$ منحنی اشباع مغناطیسی $\Rightarrow E_{af} \uparrow \Rightarrow \overline{E}_{ar} = \overline{E}_{af} - \overline{V}_t = \overline{E}_{af} - \overline{E}_r$

$\overline{E}_{ar} = j\overline{I}_a X_\varphi$ پس فازاست درجه ۹۰° $\overline{E}_{ar}$ نسبت به $\overline{I}_a$

پس ژنراتور سنكرون در حالت فوق تحريك ($I_f \uparrow$) جريان و توان سلفي (ضريب توان پس فاز) به شين بي نهايت تزريق مي كند.

www.jozve.org



شكل(۳-۳)

از سوي ديگر ژنراتور سنكرون در حالت زير تحريك ($I_f \downarrow$) جريان و توان خازني (ضريب توان پيش فاز) به شين بي نهايت تزريق مي كند.

براى موتور سنكرون دو حالت فوق بصورت معكوس خواهد بود.

به منظور تكميل روابط الكتريكي ومكانيكي در ماشين ايده آل، گشتاور و توان الكترومكانيكي آن را بدست مي آوريم.

به ازاي كاركرد ژنراتور در ضريب توان پس فاز(فوق تحريك) $\bar{V}_t = V_t \angle 0$:

$$\bar{E}_{af} = \bar{V}_t + j\bar{I}_a X_{\varphi j}$$

توان مختلف تكفاز تحويل شده به شين بي نهايت توسط ماشين:

$$\bar{S} = V_t \bar{I}_a{}^* = P + jQ$$

$$\bar{I}_a = \frac{\bar{E}_{af} - \bar{V}_t}{jX_\varphi}$$

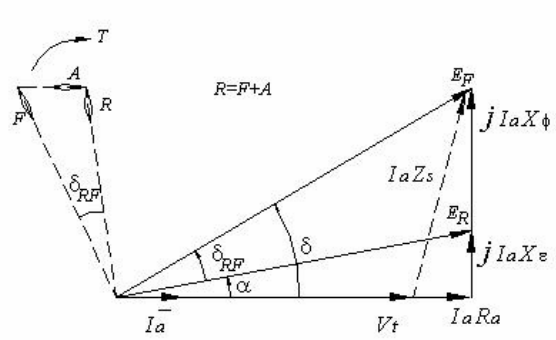
$$\bar{S} = \bar{V}_t \frac{\bar{E}_{af}{}^* - \bar{V}_t{}^*}{-jX_\varphi} = \frac{V_t E_{af} \angle -\delta}{X_\varphi \angle -90} - \frac{V_t^2}{X_\varphi \angle -90} = \frac{E_{af} V_t}{X_\varphi} \angle (90-\delta) - \frac{V_t^2}{X_{cp}} \angle 90$$

$$P_{1phase} = \text{Real}[\bar{S}] = \frac{E_{af} V_t}{X_\varphi} \cos(90-\delta) = \frac{E_{af} V_t}{X_\varphi} \sin\delta \quad [\frac{\text{watt}}{\text{phase}}]$$

$$P_{3Phase} = 3\frac{E_{af} V_t}{X_\varphi} \sin\delta$$ توان كل سه فاز

$$T = \frac{P}{\omega_s} = \frac{3}{\omega_S} \frac{E_{af} V_t}{X_\varphi} \sin\delta$$ گشتاور محور

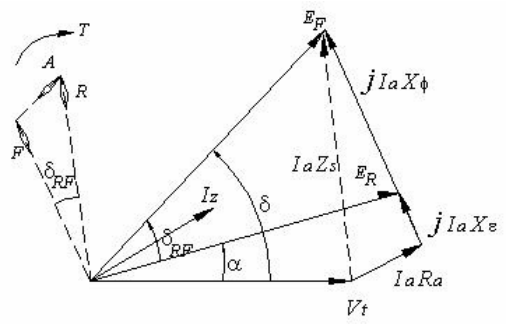
www.jozve.org



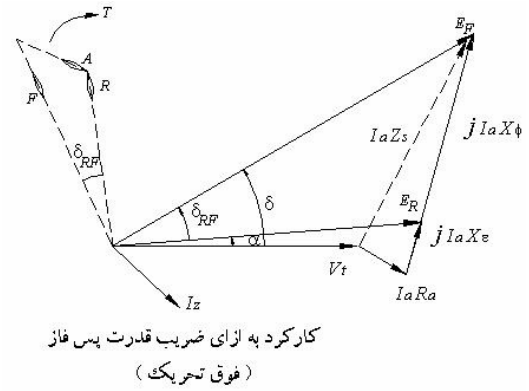
کارکرد به ازای ضریب قدرت یک
(تحریک نرمال)

شکل(۴-۳)

$$\overline{E}_f = \overline{V}_t + \overline{I}_a[R_a + j(X_l + X_\phi)]$$
$$= \overline{V}_t + \overline{I}_a(R_a + jX_S)$$
$$= \overline{V}_t + \overline{I}_a Z_S$$
$$\overline{E}_R = \overline{V}_t + \overline{I}_a(R_a + jX_l)$$



کارکرد به ازای پیش فاز
(زیر تحریک)



کارکرد به ازای ضریب قدرت پس فاز
(فوق تحریک)

دیاگرامهای فازوری برای ژنراتور سنکرون روتور استوانه ای

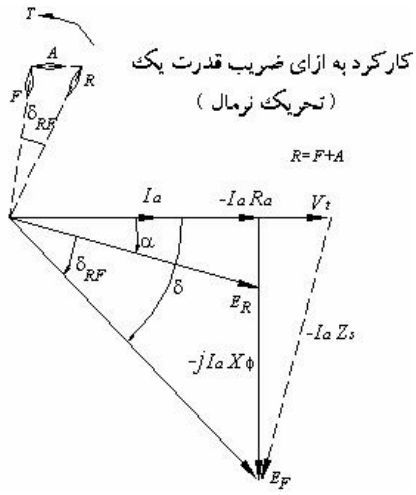
شکل(۵-۳)

مثال ۲- ۱) يك ماشين سنكرون ۶۰ هرتز, چهار قطبه, سه فاز با اتصال Y, $208\ V, 9\ kVA$ داراي مشخصات زير است:

$$R_a = 0 \qquad X_a = 1.2\Omega / ph \qquad X_\phi = 4.8\Omega / ph$$

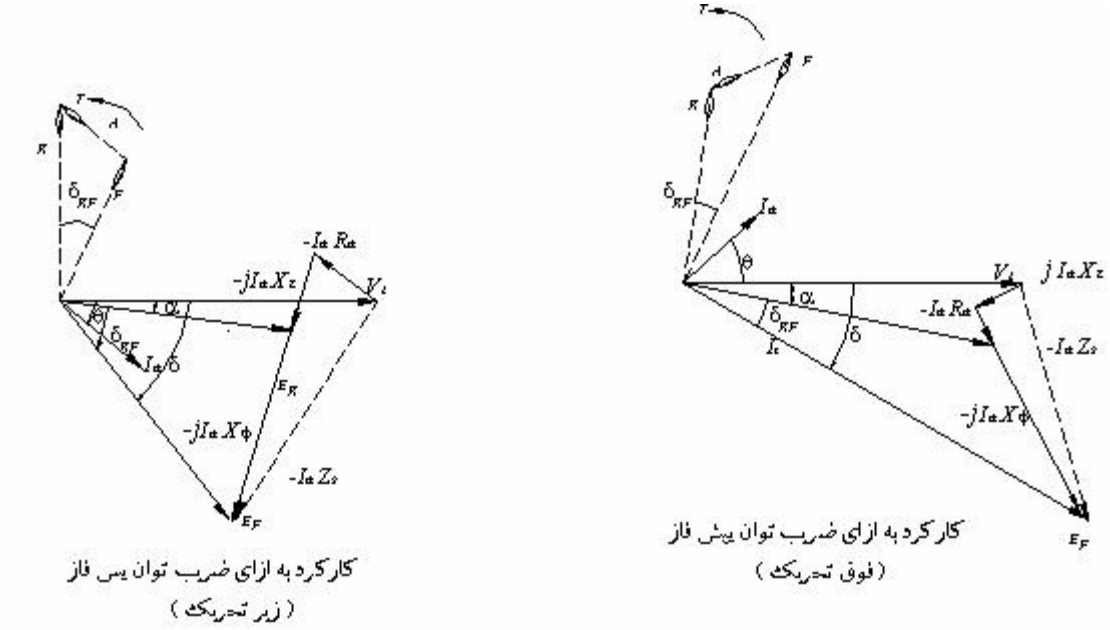
مطلوبست تعيين E_F , P , T, براي بهره برداري تحت بار كامل و ضريب توان ۰/۸ پس فاز, با استفاده از مقادير واقعي و نسبت به واحد.

www.jozve.org



شکل(۶-۳)

$$\overline{E}_f = \overline{V}_t + \overline{I}_a[R_a + j(x_l + x_\phi)]$$
$$= \overline{V}_t + \overline{I}_a(R_a + jx_S)$$
$$= \overline{V}_t + \overline{I}_a Z_S$$
$$\overline{E}_R = \overline{V}_t + \overline{I}_a(R_a + jx_l)$$



دیاگرامهای فازوری برای موتور سنکرون روتور استوانه ای

$$V_b = V_t = \frac{208}{\sqrt{3}} = 120 \ \ V/Ph$$
$$I_b = I_a = \frac{9\times10^3}{\sqrt{3}(208)} = \frac{3\times10^3}{120} = 25A$$

$$Z_b = \frac{V_b}{I_b} = 120/25 = 4.8\Omega/ph$$

www.jozve.org

$$\theta = \cos^{-1} 0.8 = 36.9^{\circ}$$

$$X_a = \frac{1.2}{4.8} = 0.25\,pu$$

$$\theta = \cos^{-1} 0.8 = 36.9^{\circ}$$

$$X_a = \frac{1.2}{4.8} = 0.25\,pu$$

$$X_s = X_\varphi + X_a = 6\Omega / ph = 1.25\,pu$$

$$E_R = V_t + I_a(R_a + jx_a)$$

$$= 120 + (25\angle -36.9)(1.2\angle 90) V / ph = 1 + 0.25\angle 55.1\,pu$$

$$= 120 + (18 + j24) \qquad = 1 + (0.15 + j0.2)$$

$$= 138 + j24 \qquad = 1.15 + j0.2$$

$$= 140.07\angle 9.87 V / Ph \qquad = 1.167\angle 9.87\,pu$$

$$E_{af} = V_t + I_a(R_a + jX_S)$$

$$= 120 + (25\angle -36.9)(6\angle 90) \qquad = 1 + 1.25\angle 53.1$$

$$= 210 + j120 \qquad = 1.75 + j1.0$$

$$= 241.87\angle 29.74 \qquad = 2.029.74$$

از معادله ۲- ۱۹ داریم:

$$P = 3\left[\frac{(241.87)(140.07)}{4.8}\right]\sin(29.74 - 9.87) = 7.200W$$

$$= 3\left[\frac{(241.87)(120)}{6.0}\right]\sin(29.74) = 7.200$$

$$= 3\left[\frac{(140.07)(120)}{1.2}\right]\sin 9.87 = 7.200$$

$$T = \frac{P}{\omega_S} = \frac{7.200}{60\pi} = 38.2 \;\; N.m$$

و از معادله۲- ۲۱ داریم :

$$pu\;\; T = pu\;\; P = \left[\frac{E_F V_t}{X_S}\right]\sin\delta = \left(\frac{2.016}{1.25}\right)\sin 29.74 = 0.8\,pu$$

$$= \left[\frac{E_F E_R}{X_\varphi}\right] Sin\delta_{RF} = (2.016)(1.67)\sin 19.87 = 0.8\,pu$$

$$= \left[\frac{E_R V_t}{X_l}\right]\sin a = \left(\frac{1.167}{0.25}\right)\sin 9.87 = 0.8\,pu$$

www.jozve.org