

اتصال کوتاه ناگهانی یک ماشین سنکرون

یک ماشین سنکرون با قطب‌های صاف و سیم پیچی‌های مستهلک کننده

روی هر دو محورهای طولی و عرضی

ترجمه :

فرخ حبیبی اشرفی

مهندس برق

در بحث قبلی پدیده اتصال کوتاه ناگهانی حالتی مطالعه شده بود که سیم پیچی مستهلک کننده فقط روی محور عرضی رتور قرار گرفته و پارامترهای آن (راکتانسها و مقاومتهای ارجاع شده بطرف استاتور) با پارامترهای سیستم تحریک کننده مساوی بودند. در حالات واقعی سیم پیچی مستهلک کننده فقط روی محور عرضی تعبیه نشده بلکه روی محور طولی نیز قرار دارد در اکتانس ارجاع شده بطرف استاتور آن کمتر شده برعکس مقاومت اکتیو آن خیلی بیشتر از سیم پیچی تحریک میشود. اگر مقاومت اکتیو سیم پیچی مستهلک کننده را توسط یک مؤلفه نوری محرکه الکتریکی در مدار استاتور که با ثابت زمانی :

$$T''_d = \frac{L''_y}{r'_y}$$

مستهلک میشود بحساب بیاوریم و از مقاومت اکتیو سیم پیچی تحریک صرف نظر کنیم معادلات دیفرانسیلی مربوط به ارتباط ترانسفورماتوری بین مدارهای استاتور و رتور برای محور طولی شکل زیر را بدست میآورد:

$$(1) \left\{ \begin{array}{l} L_d \frac{di_A}{dt} + M_{ad} \frac{di_{eA}}{dt} + M_{ad} \frac{di_{yA}}{dt} + r_{aA} i_A = [E_{om}^{III} + E_{om}^{IV} \varepsilon - \frac{t}{T''_d}] \sin(\omega t + \Psi) \\ L_e \frac{di_{eA}}{dt} + M_{ad} \frac{di_A}{dt} + M_{ad} \frac{di_{yA}}{dt} \approx 0 \\ L_y \frac{di_{yA}}{dt} + M_{ad} \frac{di_A}{dt} + M_{ad} \frac{di_{eA}}{dt} \approx 0 \end{array} \right.$$

که در آن i_{yA} و i_{eA} جریانه‌های معادل سیم پیچی‌های تحریک کننده و مستهلک کننده رتور چرخنده ارجاع شده به سیستم غیرچرخان مدار استاتور میباشد.

با حذف کردن i_{yA} و i_{eA} از معادله (۵۱) بدست می‌آوریم:

$$(52) \quad L''_d \frac{di_A}{dt} + r_a i_A = [E_{om}^{III} + E_{om}^{IV} \varepsilon - \frac{t}{T''_d}] \sin(\omega t + \Psi)$$

که در آن L''_d اندوکتانس فراری طولی معادل^(۱) سیم پیچی استاتور با در نظر گرفتن اثر پرده‌ای^(۲) سیم پیچی‌های تحریک کننده و مستهلک کننده میباشد و مساویست با:

$$(53) \quad L''_d = (L_d - M_{ad}) + \frac{M_{ad}(L_e - M_{ad})(L_y - M_{ad})}{L_e L_y - M_{ad}^2}$$

$$= (L_d - M_{ad}) + \frac{1}{\frac{1}{M_{ad}} + \frac{1}{L_e - M_{ad}} + \frac{1}{L_y - M_{ad}}}$$

$$= L_{\sigma a} + \frac{1}{\frac{1}{M_{ad}} + \frac{1}{L_{\sigma e}} + \frac{1}{L_{\sigma y}}}$$

معادله (۵۲) را برای جریان i_A حل میکنیم و چنین بدست می‌آوریم:

$$i_A = \frac{E_{om}^{III} + E_{om}^{IV} \varepsilon - \frac{t}{T''_d}}{\sqrt{r_a^2 + \omega^2 L''_d{}^2}} \sin(\omega t + \Psi - \phi'') - \frac{E_{om} \varepsilon - \frac{t}{T_a}}{\sqrt{r_a^2 + \omega^2 L''_d{}^2}}$$

$$(54) \quad \sin(\Psi - \phi'') = i''_{AS} + i''_{Aa}$$

در اینجا T_a ثابت زمانی مستهلک شدن جریان آپریودیک استاتور در موقع وجود داشتن یک سیم پیچی مستهلک کننده روی محور طولی استاتور میباشد و مساویست با:

$$(55) \quad T_a = \frac{L''_d}{r_a}$$

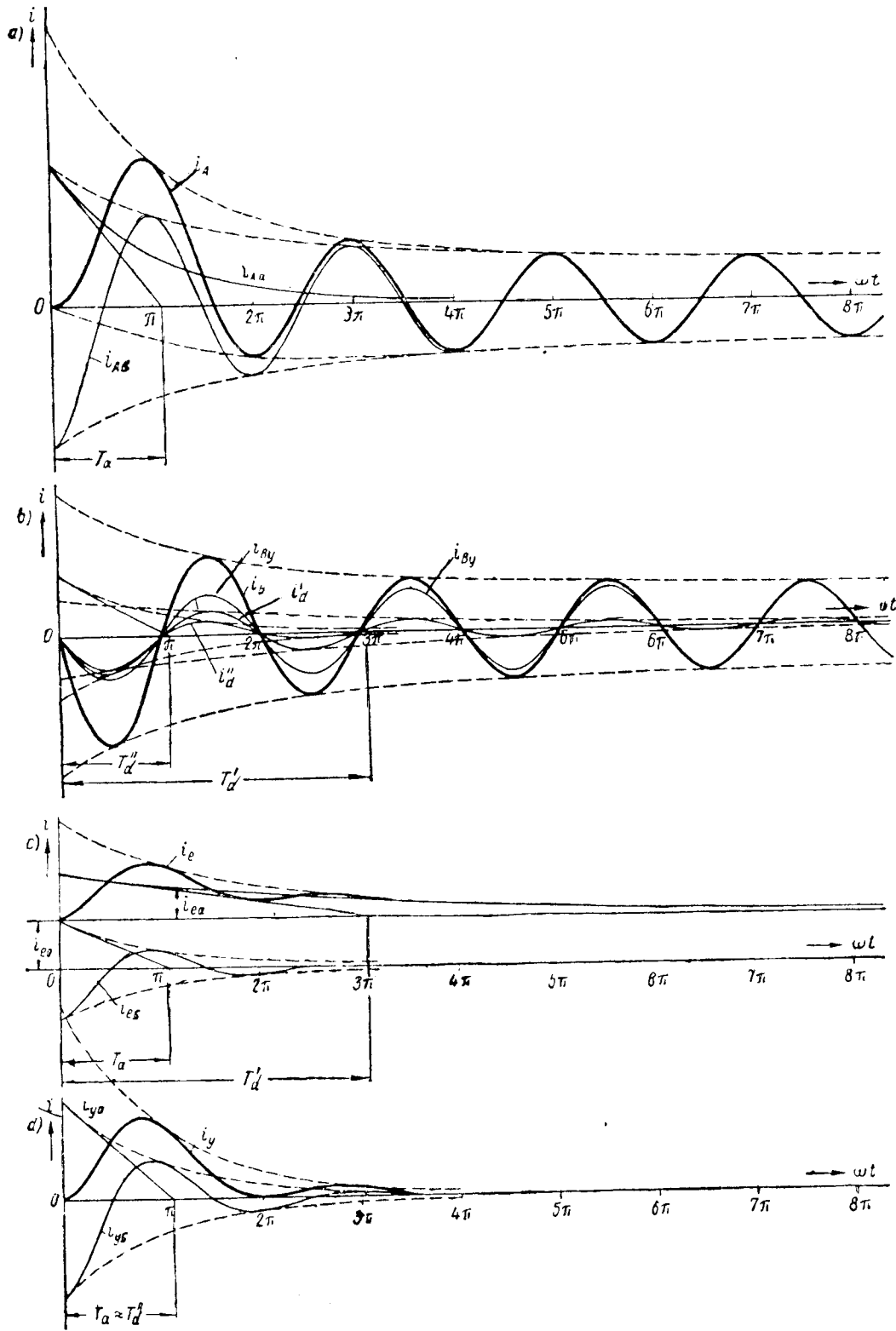
و T''_d ثابت زمانی مستهلک شدن جریان آپریودیک سیم پیچی مستهلک کننده و مؤلفه پریودیک جریان سیم پیچی استاتور مربوط بان میباشد و مساویست با:

$$(56) \quad T''_d = \frac{L''_y}{r_y}$$

در عبارت بالا L''_y اندوکتانس فراری طولی معادل سیم پیچی مستهلک کننده است و مساویست با:

۱- Equivalent direct-axis leakage inductance

۲- Shielding effect



شکل ۸

$$(۵۷) \quad L''_y = (L_y - M_{ad}) + \frac{1}{\frac{1}{M_{ad}} + \frac{1}{L_e - M_{ad}} + \frac{1}{L_d - M_{ad}}}$$

$$= L_{oy} + \frac{1}{\frac{1}{M_{ad}} + \frac{1}{L_{oe}} + \frac{1}{L_{oa}}}$$

وقتیکه روی محورهای طولی و عرضی سیم پیچی های مستهلک کننده قرارداد شده باشند در پریود اولیه اتصال کوتاه در سیم پیچی های استاتور و سیم پیچی مستهلک کننده رتور موج جریان بزرگتری از حالتی که روی محور طولی هیچ سیم پیچی مستهلک کننده ای قرار ندارد بوجود می آید. نتیجه بالا از روی این امر مسلم بدست آمده که :

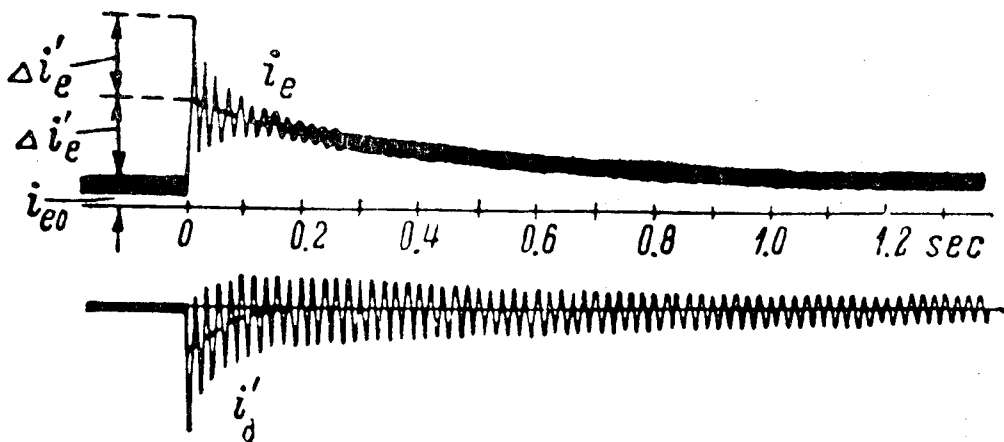
$$L''_d < L'_d$$

و چون مقاومت اکتیو نسبی سیم پیچی مستهلک کننده r_y با اندازه قابل توجهی بزرگتر از مقاومت سیم پیچی r_e میباشد ثابت زمانی :

$$T''_d < T'_d$$

و بنابراین موج جریان در سیم پیچی مستهلک کننده سریعاً مستهلک میشود. پس از آن استهلاک آهسته تری در سیم پیچی تحریک با ثابت زمانی T'_d صورت میگیرد که این امر مترادف است با مرحله اتصال کوتاه ناگهانی در حالتی که ماشین سیم پیچی مستهلک کننده اخیر را نداشته باشد.

بر طبق مطالب بالا جریان پریودیک استاتور شامل یک مؤلفه فوق گذرا i''_d (۱) ناشی از جریان آپریودیک سیم پیچی مستهلک کننده i_{ya} که با ثابت زمانی T''_d مستهلک میشود و یک مؤلفه گذرا i'_d (۲) ناشی از جریان آپریودیک سیم پیچی تحریک i_{ea} که با ثابت زمانی T'_d مستهلک میشود میباشد.

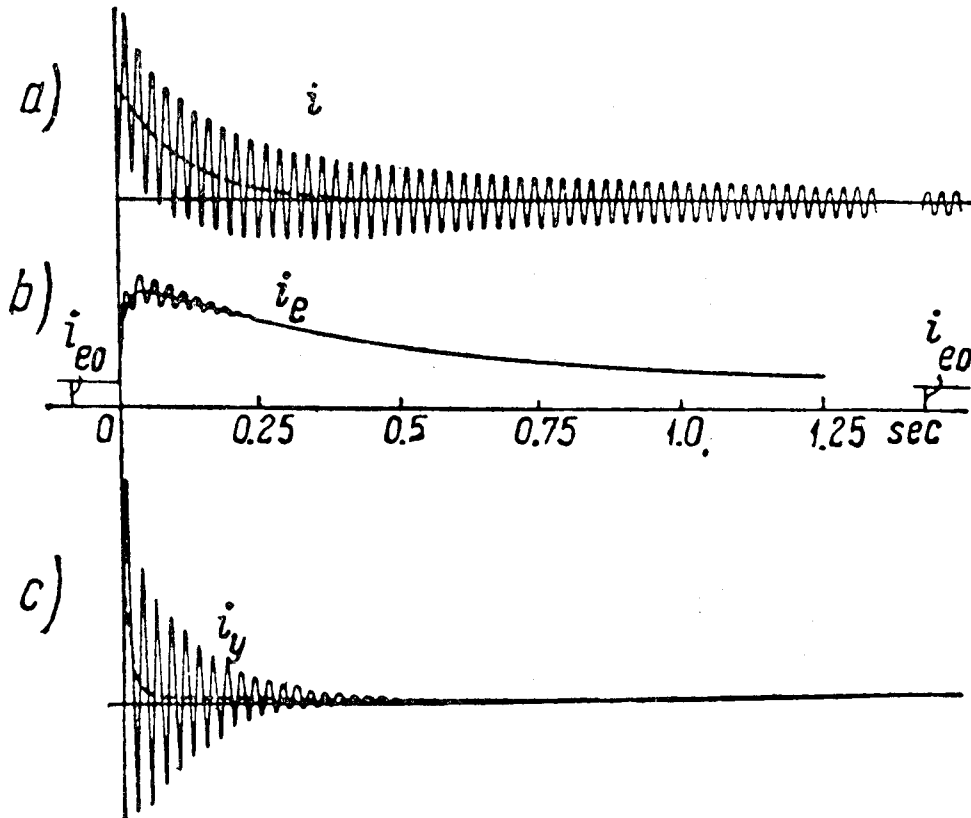


شکل ۹- اسیلوگرامهای جریانهای استاتور و رتور در حالت اتصال کوتاه ناگهانی برای یک ژنراتور سنکرون بدون سیم پیچی مستهلک کننده روی رتور

۱- Subtransient component

۲- Transient component

شکل (۸) منحنی‌های جریانهای اتصال کوتاه را که در حالت وجود داشتن سیم پیچی مستهلک کننده روی محور طولی در سیم پیچی‌ها جریان پیدا میکنند را نشان میدهد. ثابت‌های زمانی T_a و T_d معمولاً همیشه از لحاظ مقدار مساوی هستند و در شکل (۸) نیز فرض شده که مساوی هم باشند. شکل‌های (۹) و (۱۰) اسیلوگرامهای جریانهای اتصال کوتاه ناگهانی را برای یک ژنراتور با سیم پیچی مستهلک کننده و بدون سیم پیچی مستهلک کننده نشان میدهد.



شکل ۱۰ - اسیلوگرامهای جریانهای استاتور - تحریک و سیم پیچی مستهلک کننده برای اتصال کوتاه ناگهانی

۵ - مدارهای معادل برای رآکتانسهای ماشین سنکرون در یک اتصال کوتاه ناگهانی :
از روی عبارت رآکتانس :

$$x = \omega L = \omega k_1 w^2$$

میتوان دید که در یک فرکانس ثابت :

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

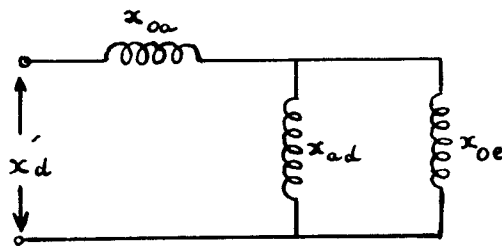
رآکتانس x با اندوکتانس L و پرمانس مغناطیسی k_1 متناسب است. اگر رآکتانس را بر حسب مقدار نسبت بواحد (۱) بیان کنیم :

۱- Per unit value

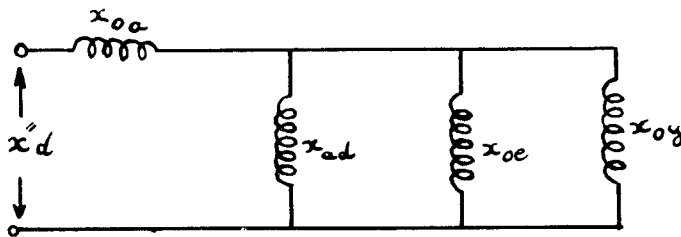
$$(۵۸) \quad x = \frac{xI_n}{E_n} = \frac{x}{x_n} = \frac{L}{L_n} = L = \frac{A}{A_n} = A$$

یعنی برحسب مقادیر نسبت بواحد را کتانس x مساوی اندوکتانس مربوط L و پرمانس مغناطیسی مربوطه A میباشد.

از اینرو نتیجه میشود که مدارهای معادل برای راکتانسهای نسبت بواحد در آن واحد میتوانند مدارهای معادل برای اندوکتانسها و پرمانسهای مغناطیسی را نشان بدهند تنها با این تفاوت که از نظر فیزیکی بین x و L و A رابطه مستقیمی وجود دارد در صورتیکه برحسب مقادیر نسبت بواحد بین مقادیر x و L و A علامت مساوی میتواند قرار بگیرد.



شکل ۱۱ - مدار معادل برای راکتانس طولی گذرا



شکل ۱۲ - مدار معادل برای راکتانس طولی فوق گذرا

اگر اندوکتانس L و مقاومت آکتیو r برحسب سیستم واحدهای فیزیکی MKSA بیان شوند

نسبت آنها $\frac{L}{r}$ ثابت زمانی T را برحسب ثانیه میدهد در صورتیکه برحسب مقادیر نسبت بواحد بیان شوند نسبت آنها $\frac{L}{r}$ ثابت زمانی را برحسب رادیان میدهد.

$$T = \omega T$$

که در آن زمان T برحسب ثانیه میباشد.

چون عباراتی که برای پرمانسها و راکتانسها در حالت اتصال کوتاه ناگهانی که روی محور طولی

فقط سیم پیچی تحریک قرار داشته باشد بدست آمده اند شکل زیر را دارند:

$$A'_d = A_{oa} + \frac{1}{\frac{1}{A_{ad}} + \frac{1}{A_{oe}}}$$

و

$$L'_d = L_{\sigma a} + \frac{1}{\frac{1}{M_{ad}} + \frac{1}{L_{\sigma e}}}$$

که نوشتن عبارت مربوط به را کتانس طولی گذرا را ممکن میسازد:

$$x'_d = \omega L'_d = x_{\sigma a} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma e}}}$$

و مدار معادل شکل (۱۱) را برای x'_d میسازیم. بهمین ترتیب برای حالت اتصال کوتاه ناگهانی با دو سیم پیچی (تحریک کننده و مستهلک کننده) روی محور طولی رتور عبارت زیر را بدست میآوریم:

$$L''_d = L_{\sigma a} + \frac{1}{\frac{1}{L_{ad}} + \frac{1}{L_{\sigma e}} + \frac{1}{L_{\sigma y}}}$$

و

$$L''_d = L_{\sigma a} + \frac{1}{\frac{1}{M_{ad}} + \frac{1}{L_{\sigma e}} + \frac{1}{L_{\sigma y}}}$$

که نوشتن عبارت مربوط به را کتانس طولی فوق گذرا را ممکن میسازد:

$$(۵۹) \quad x''_d = \omega L''_d = x_{\sigma a} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma e}} + \frac{1}{x_{\sigma y}}}$$

و مدار معادل شکل (۱۲) را برای x''_d میسازیم.

۶- ثابت‌های زمانی برای یک اتصال کوتاه پل‌فازه و سیم‌تریک:

ثابت زمانی T'_d که قبلاً معرفی شده ثابت زمانی سیم پیچی تحریک و قتیکه سیم پیچی‌های استاتور بسته میباشند است.

اگر یک سیم پیچی تحریک با جریان:

$$i_e = i_{e0}$$

را و قتیکه سیم پیچی‌های استاتور باز باشند و هیچگونه سیم پیچی مستهلک کننده روی محور طول نباشد اتصال کوتاه کنیم جریان i_e برطبق قانونی که توسط معادله زیر تعیین میشود صفر میشود:

$$L_e \frac{di_e}{dt} + r_e i_e = 0$$

حل این معادله برای شرط اولیه $i_e = i_{e0}$ در لحظه $t = 0$ چنین میشود

$$i_e = i_e \varepsilon - \frac{t}{T_{do}}$$

که در آن :

$$(60) \quad T_{do} = \frac{L_e}{r_e} = \frac{X_e}{\omega r_e}$$

ثابت زمانی سیم پیچی تحریک کننده برای موقعی که سیم پیچی استاتور باز است میباشد. ثابت زمانی T'_{do} سیم پیچی تحریک کننده برای استاتور با سیم پیچی بسته میتواند برحسب ثابت زمانی T_{do} بیان شود.

$$T'_{do} = \frac{x'_e}{\omega L_e} = \frac{x'_e}{X_e} T_{do}$$

راکتانس X_e سیم پیچی تحریک که بطرف استاتور ارجاع شده مساویست با :

$$X_e = x_{ae} + x_{ad}$$

وقتی که سیم پیچی استاتور اتصال کوتاه شود شار مغناطیسی اصلی تحریک کننده همانطوریکه در شکل (۲d) نشان داده شده به مسیر شار فراری سیم پیچی استاتور انحراف پیدا میکند بنابراین پرمانس مغناطیسی سیم پیچی تحریک کننده مساویست با :

$$(61) \quad A'_e = A_{ae} + \frac{A_{ad} A_{\sigma a}}{A_{ad} + A_{\sigma a}}$$

زیرا مطابق شکل (۲d) راکتانسهای مربوط به پرمانسهای A_{ad} و $A_{\sigma a}$ سری هستند. راکتانس معادل x'_e سیم پیچی تحریک کننده مربوط به پرمانس A'_e مساویست با :

$$x'_e = x_{\sigma e} + \frac{x_{ad} x_{\sigma a}}{x_{ad} + x_{\sigma a}}$$

از روی روابط بالا برای x'_e و X_e نسبت آنها مساویست با :

$$\begin{aligned} \frac{x'_e}{X_e} &= \frac{x_{\sigma e} + \frac{x_{ad} x_{\sigma a}}{x_{ad} + x_{\sigma a}}}{x_{\sigma e} + x_{ad}} = \frac{x_{ad} x_{\sigma e} + x_{\sigma a} x_{\sigma e} + x_{ad} x_{\sigma a}}{(x_{\sigma e} + x_{ad})(x_{\sigma a} + x_{ad})} \\ &= \frac{x_{\sigma a} + \frac{x_{\sigma a} x_{ad}}{x_{\sigma a} + x_{ad}}}{x_{\sigma a} + x_{ad}} = \frac{x'_d}{x_d} \end{aligned}$$

مطابق نتیجه بالا ثابت زمانی T'_{do} سیم پیچی تحریک کننده برای استاتور با مدار بسته برحسب ثابت زمانی T_{do} برای استاتور با مدار باز بصورت زیر بیان میشود :

$$(62) \quad T'_{do} = \frac{x'_d}{x_d} T_{do}$$

ثابت زمانی T''_{do} جریان فوق گذرا بواسطه مقاومت آکتیو قابل توجه سیم پیچی مستهلک کننده

خیلی کوچک میباشد و برای توربوژنراتورها میتوان فرض کرد که :

$$(۶۳) \quad T''_d \approx \frac{1}{8} T'_d$$

۷- اتصال کوتاه ناگهانی یک ماشین سنکرون پلی فازه با قطب های برجسته :

در حالت یک ماشین سنکرون با قطب برجسته را کتانس عرضی سنکرون x_q مساوی را کتانس طولی

x_d نیست .

در اینجا ساده ترین حالت یعنی یک ماشین سنکرون دو فازه با سیم پیچی تحریک کننده روی محور طولی

و بدون سیم پیچی های مستهلک کننده روی محورهای طولی و عرضی رتور در نظر میگیریم .

اگر در چنین ماشینی اتصال کوتاه ناگهانی رخ دهد هنگامیکه رتور با اندازه ϕ درجه چرخید مقدار

مؤلفه آپریودیک جریان در سیم پیچی استاتور تغییر خواهد کرد زیرا در حالت اول در مقابل فاز مزبور محور طولی رتور قرار داشت در حالیکه در حالت دوم در مقابلش محور عرضی رتور قرار دارد .

در حالت اول مقدار اولیه جریان آپریودیک چنین است :

$$I_{adm} = \frac{E_{om}}{x'_d}$$

و در حالت دوم :

$$I_{aqm} = \frac{E_{om}}{x'_q} = \frac{E_{om}}{x_q}$$

مقدار متوسط جریان آپریودیک در لحظه $t = 0$ چنین است :

$$I_{a.av.m} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x'_d} + \frac{1}{x_q} \right) E_{om}$$

اگر فرض کنیم که تغییر پرمانس مغناطیسی از مقدار متوسطش وقتیکه از محور طولی به محور عرضی

میآئیم بصورت تابع یک موج سینوسی با فرکانس دو برابر صورت میگیرد در این صورت :

$$i_a = \frac{1}{2} E_{om} \left[\left(\frac{1}{x'_d} + \frac{1}{x_q} \right) \cos 2\Psi + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_q} \right) \cos 2(\omega t + \Psi) \right] \varepsilon^{-\frac{t}{T_a}}$$

مقدار :

$$(۶۵) \quad \frac{2}{\frac{1}{x'_d} + \frac{1}{x_q}} = \frac{2x'_d x_q}{x'_d + x_q} = x_r$$

را کتانس معکوس^(۱) مربوط به کار کردن غیرسیمتری یک ماشین سنکرون را نشان میدهد . تا

آنجائیکه به جریان پرریودیک اتصال کوتاه مربوط است ساختمان قطب برجسته تأثیر مخصوصی را در مورد آن ابراز نمیدارد.

۸- جریانهای کلی - شوک^(۱) و مؤثر اتصال کوتاه پللی فازه سیمتریك :

روابطی که قبلاً بدست آمده‌اند امکان برقراری عباراتی جهت جریان کلی اتصال کوتاه سیم پیچی استاتور را فراهم میسازند. در این حالت همانطوریکه اغلب فرض میشود در اسپدانس ها از مؤلفه‌های آکتیو در مقابل مؤلفه‌های رآکتیو صرفنظر میکنیم. عبارت برای جریان با فرض اینکه اتصال کوتاه ناگهانی وقتی رخ میدهد که ماشین بدون بار است و بین برنهایش فشار الکتریکی نامی موجود است تعیین میشود. از نظر سادگی روابط برای یک ماشین سنکرون با قطب‌های صاف نوشته میشوند.

جریان اتصال کوتاه در فشار الکتریکی نامی چنین است :

$$I_{Se} = \frac{E_m}{X} = I_n \frac{1}{X}$$

در نتیجه دامنه جریان اتصال کوتاه مداوم چنین خواهد بود :

$$I_{Smo} = I_{nm} \frac{1}{X_d}$$

دامنه جریان گذرای اولیه اتصال کوتاه سیمتریك مساویست با :

$$I'_{Smo} = I_{nm} \frac{1}{X'_d}$$

و دامنه جریان فوق گذرای اولیه اتصال کوتاه سیمتریك چنین است :

$$I''_{Smo} = I_{nm} \frac{1}{X''_d}$$

مقدار حداکثر جریان آپریودیک اولیه اتصال کوتاه مساویست با :

$$I''_{amo} = I''_{mo} = I_{nm} \frac{1}{X''_d}$$

وقتیکه جریان اتصال کوتاه مستهلک میشود، مؤلفه پرریودیک منتهجه آن به سه قسمت تقسیم میشود :

$$i_{sc-s} = i_s + (i'_s - i_s) + (i''_s - i'_s)$$

مؤلفه گذرای آن :

$$i'_n = i'_s - i_s = I'_d$$

بائبات زمانی T'_d و مؤلفه فوق گذرا :

$$i''_n = i''_s - i'_s = I''_d$$

با ثابت زمانی T_d'' مستهلک میشود و i_S جریان اتصال کوتاه مداوم میباشد. مؤلفه آپریودیک i_n با ثابت زمانی T_a مستهلک میشود. در نتیجه معادله جریان اتصال کوتاه منتهی میتواند بصورت زیر نوشته شود:

$$(66) \quad i_{Sc} = i_S + (i'_{S_0} - i_{S_0}) \varepsilon^{-\frac{t}{T_d'}} + (i''_{S_0} - i'_{S_0}) \varepsilon^{-\frac{t}{T_d''}} + i_{a_0} \varepsilon^{-\frac{t}{T_a}}$$

$$= I_{nm} \left[\frac{1}{x_d} \cos(\omega t + \Psi) + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) \varepsilon^{-\frac{t}{T_d'}} \cos(\omega t + \Psi) \right. \\ \left. + \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) \varepsilon^{-\frac{t}{T_d''}} \cos(\omega t + \Psi) + \frac{1}{x_d''} \varepsilon^{-\frac{t}{T_a}} \cos \Psi \right]$$

برطبق استاندارد GOST 183-55 جریان شوک اتصال کوتاه، حداکثر ممکنه مقدار لحظه‌ای جریان استاتور برای یک‌تحریک معین ماشین چرخنده است که در اتصال کوتاه ناگهانی تمام برنهای خروجی ماشین پیدا میشود. مقدار جریان شوک اتصال کوتاه از نقطه نظر نیروهای مکانیکی مؤثر روی سیم‌پیچی‌ها و محور ماشین در موقع اتصال کوتاه مهم است.

در بیشتر حالات نامساعد مقدار اولیه جریان آپریودیک مساویست با مقدار اولیه جریان پریودیک

یعنی تقریباً $\frac{E_m}{x_d''}$ و حداکثر جریان در نصف یک پریود اتفاق می‌افتد. در موقع وجود نداشتن تضعیف جریان شوک مساوی $\frac{2E_m}{x_d''}$ خواهد بود.

در عمل جریان شوک اتصال کوتاه بوسیله فرمول زیر حساب میشود:

$$(67) \quad i_{Sc(Shock)} \approx \frac{1.8 \times 1.05 \sqrt{2}}{x_d''} U_n$$

که در آن U_n ولتاژ نامی فاز و ۱.۸ مقدار متوسط فاکتور شوک با بحساب آوردن مقدار مستهلک شدن جریان در حین نصف پریود میباشد. چون فرض شده که اتصال کوتاه در حالت بی‌باری رخ میدهد فاکتور ۱.۰۵ امکان کار کردن ماشین را در فشار الکتریکی $1.05 U_n$ فراهم می‌سازد.

استاندارد U.S.S.R. در حال حاضر مقدار جریان شوک را محدود نکرده است ولی هر ژنراتوری

باید جریان شوک اتصال کوتاه را در حالت بدون بار و فشار الکتریکی ۱.۰۵٪ مقدار نامی تحمل کند. عملاً جریان شوک میتواند بمقداری باندازه ۱.۰ برابر دامنه جریان نامی برسد.

چون جریان پریودیک یک جریان متناوب مستهلک شونده است مقدار مؤثر جریان در هر لحظه

بوسیله روش عمومی از معادله زیر تعیین میشود:

$$(68) \quad I''_{St} = I_S + (I'_{S_0} - I_S) \varepsilon^{-\frac{t}{T_d'}} + (I''_{S_0} - I'_{S_0}) \varepsilon^{-\frac{t}{T_d''}}$$

$$= I_S + I'_{d_0} \varepsilon^{-\frac{t}{T_d'}} + I''_{d_0} \varepsilon^{-\frac{t}{T_d''}}$$

و :

$$I'_{S_0} = \frac{E_0}{x'_d}$$

مقدار مؤثر اولیه جریان گذرا بدون بحساب آوردن مؤلفه فوق گذرا و :

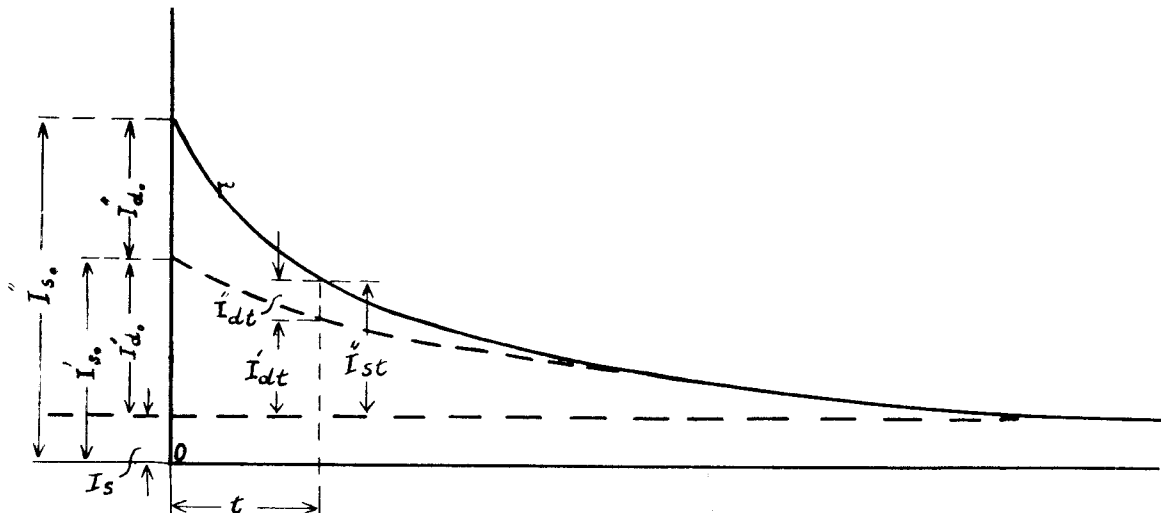
$$I'_{d_0} = I'_{S_0} - I_S$$

و

$$I''_{d_0} = I''_{S_0} - I'_{S_0}$$

مقادیر مؤثر اولیه مؤلفه های فوق گذرا و گذرای جریان پریودیک و I_S مقدار مؤثر جریان اتصال کوتاه مداوم میباشد .

منحنی مقدار مؤثر جریان پریودیک منتهی به وسیله منحنی ۳ در شکل (۱۳) نشان داده شده . واضح است که محورهای مختصات منحنی در شکل (۱۳) $\sqrt{2}$ مرتبه کمتر از منحنی پوش شکل (۸b) میباشد .



شکل ۱۳ - منحنی های سستهک شونده مقادیر مؤثر جریان پریودیک برای اتصال کوتاه ناگهانی یک ماشین سنکرون

مقدار مؤثر اولیه جریان اتصال کوتاه منتهی به I''_0 مساویست با ریشه دوم مجموع مربع های مقدار مؤثر اولیه مؤلفه پریودیک جریان I''_{S_0} و مقدار اولیه مؤلفه آپریودیک I''_{a_0} یعنی :

$$\begin{aligned} I''_0 &= \sqrt{I''_{S_0}{}^2 + I''_{a_0}{}^2} = \sqrt{I''_{S_0}{}^2 + I''_{S_0}{}^2} \\ &= \sqrt{I''_{S_0} + (\sqrt{2}I''_{S_0})^2} = 1.73I''_{S_0} \end{aligned} \quad (69)$$

جریان I''_0 از مقدار مؤثر اولیه پریودیک جریان I''_{S_0} باندازه :

$$I''_{a_0} = 0.73 I''_{S_0}$$

بیشتر میباشد .

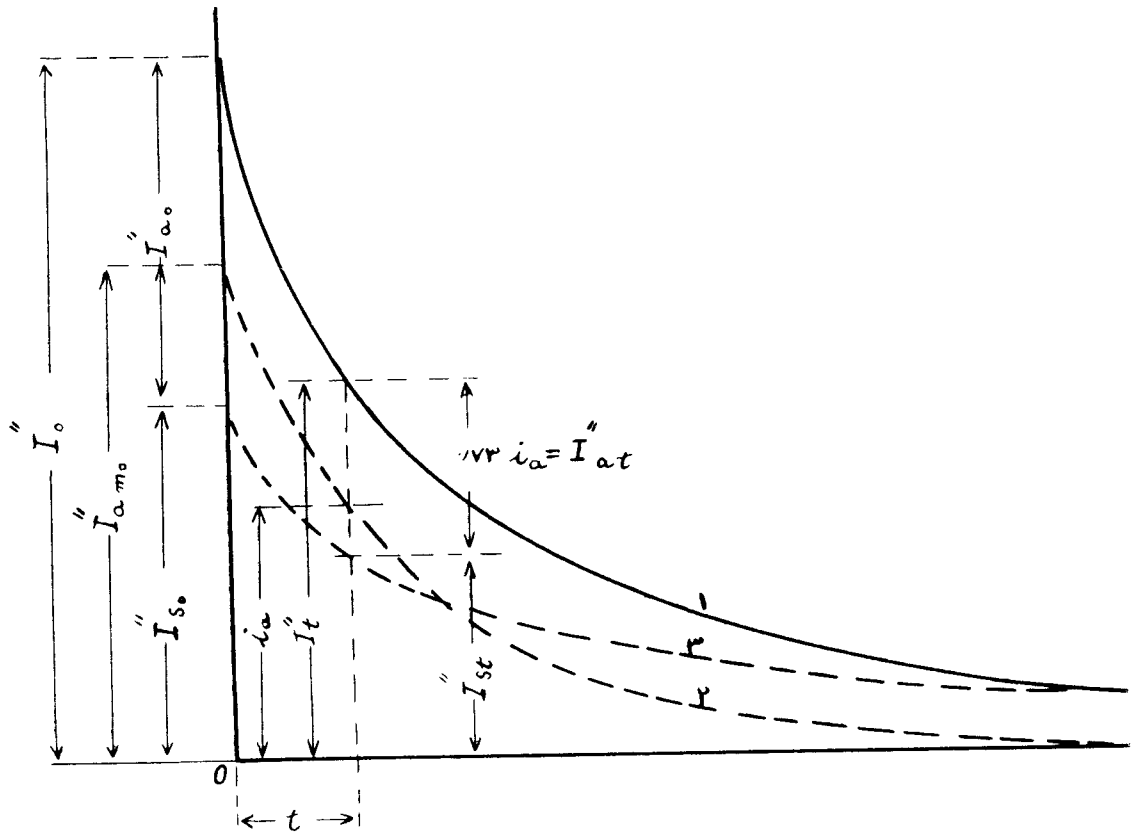
تفاوت بین مقدار مؤثر جریان کلی I''_0 و مقدار مؤثر جریان پریودیک I''_{S_0} با ثابت زمانی T_a مستهلک میشود و بوسیله عبارت زیر نشان داده میشود.

$$(۷۰) \quad I''_{at} = I''_{a_0} \varepsilon^{-\frac{t}{T_a}} = ۰.۷۳ I''_{S_0} \varepsilon^{-\frac{t}{T_a}}$$

بنابراین مقدار مؤثر جریان کلی بوسیله معادله زیر نشان داده خواهد شد :

$$(۷۱) \quad I''_t = I''_{St} + I''_{at} = I_S + I'_{d_0} \varepsilon^{-\frac{t}{T'_d}} + I''_{d_0} \varepsilon^{-\frac{t}{T''_d}} + ۰.۷۳ I''_{S_0} \varepsilon^{-\frac{t}{T_a}}$$

مقدار مؤثر جریان کلی بوسیله منحنی ۱ در شکل (۱۴) نشان داده شده بطوریکه منحنی ۲ مؤلفه آپریودیک جریان و منحنی ۳ مقدار مؤثر مؤلفه پریودیک جریان را نشان میدهد.



شکل ۱۴- منحنی های مستهلک شونده مقادیر مؤثر جریان کلی اتصال کوتاه و مؤلفه هایش

معادله مقدار مؤثر جریان در اتصال کوتاه ناگهانی برای فشار الکتریکی بی باری :

$$U = U_n$$

برحسب مقادیر نسبت بواحد شکل زیر را خواهد داشت :

$$(۷۲) \quad \mathbf{I}''_i = \frac{1}{\mathbf{x}_d} + \left(\frac{1}{\mathbf{x}'_d} - \frac{1}{\mathbf{x}_d} \right) \varepsilon^{-\frac{t}{T'_d}} + \left(\frac{1}{\mathbf{x}''_d} - \frac{1}{\mathbf{x}'_d} \right) \varepsilon^{-\frac{t}{T''_d}} + 0.۷۷۳ \frac{1}{\mathbf{x}''_d} \varepsilon^{-\frac{t}{T_a}}$$

این معادله از روی معادله (۷۱) با قرار دادن مقادیر زیر در آن :

$$I_S = \frac{U_n}{x_d}$$

و

$$I_{d_0} = U_n \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right)$$

و

$$I''_{d_0} = U_n \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right)$$

و

$$I''_{S_0} = \frac{U_n}{x'_d}$$

که در آن :

$$x_d = \frac{x_d U_n}{I_n}$$

و

$$x'_d = \frac{x'_d U_n}{I_n}$$

و

$$x''_d = \frac{x''_d U_n}{I_n}$$

و تقسیم کردن تمام جملات این معادله بر I_n بدست آمده .

۹- اتصال کوتاه ناگهانی غیرسیمتری یک یک ماشین سنکرون :

الف) جنبه های فیزیکی پدیده - مرحله اولیه یک اتصال کوتاه دوفازه یا یکفازه را با صرف نظر کردن از مستهلک شدن جریان در سیم پیچی های استاتور و رتور در نظر میگیریم .

فرض میکنیم که اتصال کوتاه ناگهانی در لحظه ای که محور سیم پیچی معادل استاتور عمود بر محور طولی رتور مطابق شکل (۱۰۵) است رخ دهد که این حالت مترادف با حالتی است که فقط جریان پر یودیک در سیم پیچی استاتور تولید میشود . اندوکتانس متقابل معادل سیم پیچی های استاتور و رتور M مانند حالت یک اتصال کوتاه پلی فازه ثابت نخواهد ماند بلکه متناسب با $\sin \omega t$ تغییر خواهد کرد :

$$M = k_{Ad} W_a W_e \sin \omega t$$

وقتی که رتور از وضعیت اولیه اش با اندازه زاویه $\frac{\pi}{۲}$ بچرخد اندوکتانس متقابل مقدار حداکثرش را

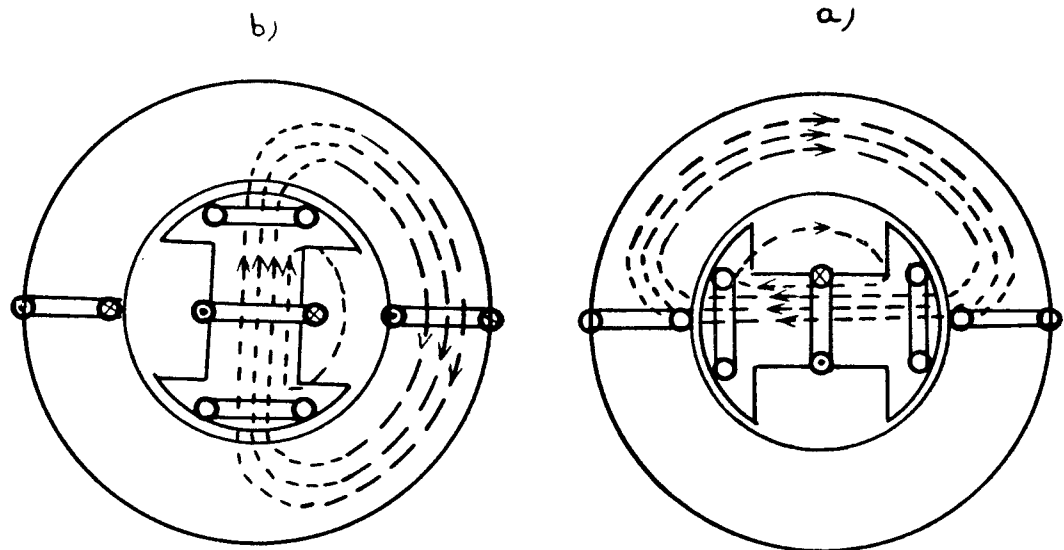
بدست خواهد آورد. لذا برای یک مقدار ثابت شار اولیه φ_0 در این وضعیت رتور حدا کثر موج جریان مساوی

در سیم پیچی استاتور ایجاد خواهد شد و در سیم پیچی تحریک کننده خواهیم داشت:

$$\Delta i_e \approx \frac{x_d - x'_d}{x'_d} i_{c0}$$

که وقتی رتور باندازه زاویه π از وضعیت اولیه اش چرخید بمقدار زیر تنزل میکند:

$$\Delta i_c = \frac{x_q - x'_q}{x'_q} i_{c0} \approx 0$$



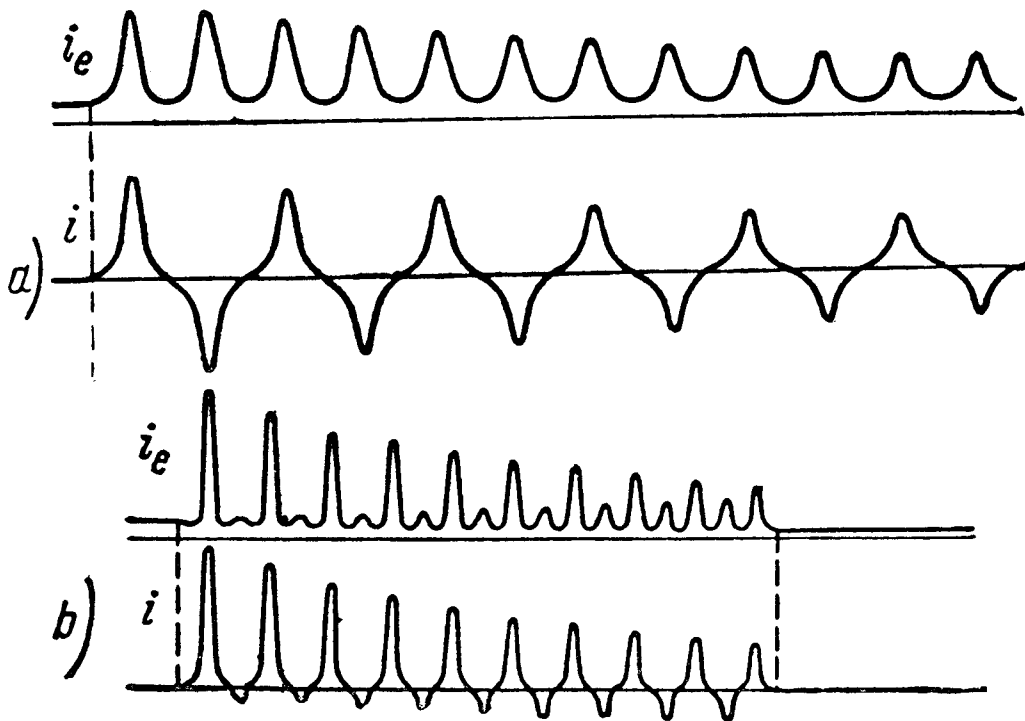
شکل ۱۰- اوضاع نسبی سیم پیچی های استاتور و رتور در اتصال کوتاه تک فازه
(a) در غیاب جریان آپریودیک استاتور (b) در حضور جریان آپریودیک استاتور

برعکس اتصال کوتاه پلی فازه وقتی که فقط مؤلفه پرریودیک جریان و سیم پیچی استاتور وجود دارد مؤلفه متناوب اضافی جریان تحریک که مقدار حدا کثرش بمقدار مؤلفه ثابت اضافی در یک اتصال کوتاه پلی فازه میرسد در سیم پیچی تحریک کننده ایجاد خواهد شد. همانطوری که از روی منحنی های جریانهای سیم پیچی های استاتور و تحریک کننده در شکل (a) دیده میشود در این حالت مؤلفه های پرریودیک جریان در هر دو سیم پیچی شامل هارمونیک های زیادی است. وجود این هارمونیکها بسادگی توسط این امر مسلم توضیح داده میشود که نیروی محرکه مغناطیسی سیم پیچی استاتور نه فقط یک میدان مستقیم بلکه میدانی با چرخش درجهت مخالف تولید میکند و این میدان در غیاب یک سیستم کامل مستهلک کننده روی رتور منجر بایجاد جریانی با فرکانس دوبرابر و سیم پیچی تحریک و یک جریان هارمونیک سوم در سیم پیچی استاتور میشود که جریان اخیر بنوبه خود باعث پیدایش تعدادی از همان هارمونیکها در سیم پیچی تحریک و مقداری هارمونیکهای فرد و سیم پیچی استاتور میشود.

بواسطه مقاومت سیم پیچی تحریک شارهای ماشین شروع به مستهلک شدن میکنند و برطبق آن جریانها در سیم پیچی استاتور نیز شروع به مستهلک شدن میکنند. همانطوری که از روی اسیلوگرام اتصال دوفازه که در شکل (۱۶a) نشان داده شده است میتوان دید.

اگر اتصال کوتاه دوفازه یا یک فازه در لحظه ای که محورهای سیم پیچی های معادل استاتور و سیم پیچی تحریک برهم منطبق هستند شروع شود (شکل b) حداکثر القاء متقابل این سیم پیچی ها در لحظه اولیه و در لحظات مترادف با تغییر رتور از این وضعیت باندازه $2k\pi$ که k عدد صحیحی است صورت خواهد گرفت. در این حالت یک مؤلفه آپریودیک جریان در سیم پیچی استاتور پیدا خواهد شد و بنابراین اگر مقاومتهای آکتیو صرف نظر شده اند، حداکثر جهش اولیه جریان دو برابر مقداری (شکل b) که فقط جریان پریودیک اتصال کوتاه وجود دارد (شکل a) میباشد. مؤلفه آپریودیک جریان استاتور باعث ایجاد هارمونیکهای فرد در سیم پیچی تحریک کننده و از همان هارمونیکهای جریان در سیم پیچی استاتور خواهد شد و نتیجتاً تمام مرحله تغییر جریان شکل را که در شکلی (b) نشان داده شده خواهد داشت. ممکن است از روی این منحنی ها دید که بعد از مستهلک شدن مؤلفه آپریودیک جریان مراحل مستهلک شدن هر دو جریان همان ماهیت یک اتصال کوتاه سیمتریک را دارند. وقتی که مرحله مستهلک شدن تمام شد و ماشین تحت شرایط اتصال کوتاه مداوم کار کرد همان هارمونیکهای جریان و سیم پیچی تحریک باقی می ماند، همانطوری که از روی اسیلوگرام شکل (a و b) میتوان دید.

با یک سیم پیچی مستهلک کننده کامل روی رتور یا رتور یک پارچه ماشینهای باقطب صاف از نوع



شکل ۱۶- اسیلوگرامهای شدت جریان اتصال کوتاه ناگهانی

(a) باوجود نداشتن جریان آپریودیک استاتور (b) باوجود داشتن جریان آپریودیک استاتور

توربوژنراتور میدان ضد سنکرونی عملاً مستهلک میشود لذا هارمونیکهای جریان در سیم پیچی های استاتور وجود نخواهند داشت و مرحله به اتصال کوتاه پلّی فازه نزدیک میشود. در اینحالت مقادیر مؤلفه های متغیر در جریان تحریک نیز مقداری کم میشوند.

در اتصال کوتاههای یک فازه یا دو فازه یک ماشین سه فازه و همچنین اتصال کوتاه یک ماشین یک فازه مقدار جریان اولیه به مقدار مؤلفه آپریودیک جریان بستگی خواهد داشت. اگر اتصال کوتاه ناگهانی در لحظه ای که نیروی محرکه الکتریکی سیم پیچی ماشین از صفر میگذرد رخ دهد حداکثر ممکنه مؤلفه آپریودیک جریان ایجاد میشود و بنابراین حداکثر جهش ممکنه جریان اولیه در اتصال کوتاه ناگهانی پیدا میشود. اگر برعکس اتصال کوتاه سیم پیچی در لحظه ای که نیروی محرکه الکتریکی از حداکثرش میگذرد رخ دهد مؤلفه آپریودیک جریان مساوی صفر است و یک وضعیت پریودیکی شروع میشود که در این موقع حداقل جهش ممکنه جریان اولیه اتصال کوتاه ناگهانی بدست میآید.

در حین اتصال کوتاه یک فازه سیم پیچی استاتور یک نیروی محرکه مغناطیسی نوسانی ایجاد میکند و بنابراین نه فقط میدان سنکرون بلکه یک میدان ضد سنکرون القاء شونده که بنوبه خود یک جریان بافر کانس دو برابر در سیم پیچی های رتور تولید میکند ایجاد میشود.

ب) روابط اساسی - مقادیر مؤثر اولیه جریانهای برای اتصال کوتاههای یک فازه و دو فازه بوسیله فرمولهائی مشابه با جریانهای مداوم اتصال کوتاههای غیرسیمتریکی حساب میشوند که در آنها فقط:

$$x_1 = x_d$$

بوسیله x'_d تغییر یافته (یا اینکه مترادفاً با x''_d) در صورتیکه x_2 و x_0 عملاً همانکه برای شرایط ماندگار و گذرا بودند باقی میمانند.

این امر بوسیله این حقیقت توضیح داده میشود که شارهای مؤلفه معکوس^(۱) و مؤلفه همسوی^(۲) استاتور بطور مجزا از شار مؤلفه مستقیم^(۳) قبلاً در شرایط ماندگار ارتباط ترانسفورماتوری با سیم پیچی های رتور وارد شده بودند و همانطوریکه تجلی و عمل این شارها نشان داده هیچ تفاوت مهمی بین شرایط ماندگار و گذرا وجود ندارد.

بنابراین برای مقادیر مؤثر جریانهای مداوم و اولیه یک اتصال کوتاه دو فازه برای:

$$E_0 = U_n$$

داریم:

$$(۷۳) \quad \begin{cases} I_{s1} = \frac{\sqrt{3}E_0}{x_d + x_2} = \frac{\sqrt{3}I_n}{x_d + x_2} \\ I'_{s02} = \frac{\sqrt{3}E_0}{x'_d + x_2} = \frac{\sqrt{3}I_n}{x'_d + x_2} \\ I''_{s02} = \frac{\sqrt{3}E_0}{x''_d + x_2} = \frac{\sqrt{3}I_n}{x''_d + x_2} \end{cases}$$

۱- Negative Sequence

۲- Zero Sequence

۳- Positive Sequence

و بهمان ترتیب برای اتصال کوتاه یک فازه :

$$(74) \quad \begin{cases} I_{S1} = \frac{rE_o}{x_d + x_r + x_o} = \frac{rI_n}{x_d + x_r + x_o} \\ I'_{S_{o1}} = \frac{rE_o}{x'_d + x_r + x_o} = \frac{rI_n}{x'_d + x_r + x_o} \\ I''_{S_{o1}} = \frac{rE_o}{x''_d + x_r + x_o} = \frac{rI_n}{x''_d + x_r + x_o} \end{cases}$$

برای مقدار مؤثر جریان اتصال کوتاه ناگهانی بصورت عمومی معادله زیر را مینویسیم :

$$(75) \quad I'_{vt} = I_{Sv} + (I'_{S_{ov}} - I_{Sv})\varepsilon \frac{t}{T'_{dv}} + (I''_{S_{ov}} - I'_{S_{ov}})\varepsilon \frac{t}{T''_{dv}} + I''_{aov}\varepsilon \frac{t}{T_{av}}$$

که در آن v زیرنویسی است که نوع اتصال کوتاه را مشخص میکند. برای اتصال کوتاه سه فازه $v=3$ و برای اتصال کوتاه دو فازه $v=2$ و برای اتصال کوتاه یک فازه $v=1$ است.

ثابت های زمانی T'_{dv} و T''_{dv} و T_{av} در این معادله برحسب نوع اتصال کوتاه قرار خواهند گرفت. ثابت زمانی مؤلفه فوق گذرای جریان میتواند برای تمام انواع اتصال کوتاهها مساوی فرض شود و مساویست با :

$$T''_{d3} = T''_{d2} = T''_{d1} \approx \frac{1}{\lambda} T'_d$$

ثابت های زمانی مستهلک شدن مؤلفه گذرای جریان مساوی هستند با :

$$(76) \quad \begin{cases} T'_{d3} = T'_d = \frac{x'_d}{x_d} T_{do} \\ T'_{d2} = \frac{x'_d + x_r}{x_d + x_r} T_{do} \\ T'_{d1} = \frac{x'_d + x_r + x_o}{x_d + x_r + x_o} T_{do} \end{cases}$$

و ثابت های زمانی مستهلک شدن مؤلفه های آپریودیک جریان مساوی هستند با :

$$(77) \quad \begin{cases} T_{a3} = T_{a2} = \frac{x_r}{\omega r_a} \\ T_{a1} = \frac{r x_r + x_o}{r \omega r_a} \end{cases}$$