ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԶԵԿՈՒՅՑՆԵՐ
ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

X 1949 1

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

А. Г. Иосифьян, чл.-корресп АН Армянской ССР

Теория самосинхронизирующихся синхронных машин. I. Параллельная работа синхронных машин в схеме передачи угла и движения

(Представлено 16 VIII 1948)

Многообразие применения синхронизирующихся систем приводит к многим принципиально отличным схемам включения синхронных машин в автоматических установках. Наиболее распространенные типовые схемы включения следующие: самосинхронизирующие схемы синхронной передачи угла и движения при однофазном и трехфазном возбуждении; работа трехфазной машины от преобразователя напряжений; работа машины двойного питания в режиме электрического диференциала; работа синхронных машин в тиратронных и ламповых схемах силового синхронного движения; параллельная работа синхронных генераторов как частный случай самосинхронизирующих синхронных машин.

В общем виде, с весьма малыми ограничениями, для анализа работы самосинхронизирующихся синхронных машин с любыми внешне приложенными напряжениями наиболее пригодным методом является метод, основанный на теории всеобщего трансформатора с переменными индуктивностями.

Этот метод был нами применен для анализа уравнений преобразования синхронной машины ([1]). Как было показано автором, линейные преобразования диференциальных уравнений синхронной машины в осях $1, j$ плоскости комплексного переменного, жестко связанных и вращающихся вместе с обмоткой возбуждения, приводит к следующим диференциальным уравнениям, заданным в операторной форме:

$$\begin{aligned} e_f &= i_f r + [p + j(p\Theta)]\psi_f \\ e_b &= i_b r + [p - j(p\Theta)]\psi_b \\ e_0 &= i_0 r + p\psi_0 \end{aligned} \qquad (1)$$

$$e_t = i_t z_t - \frac{3}{2} M_t (i_f + i_b)$$

$$0 = i_q z_q + j \frac{3}{2} M_t (i_b - i_f), \qquad (2)$$

где

$$
\begin{aligned}
e_f &= \frac{1}{3}\left(e_a + e_b\alpha + e_c\alpha^2\right) e^{-j\theta} \\
e_b &= \frac{1}{3}\left(e_a + e_b\alpha^2 + e_c\alpha\right) e^{j\theta} \\
e_o &= \frac{1}{3}\left(e_a + e_b + e_c\right)
\end{aligned}
\qquad (3)
$$

e_a, e_b, e_c, e_o — фазовые напряжения; $\alpha = e^{j\frac{2}{3}\pi}$; $\alpha^2 = e^{-\frac{2}{3}\pi}$; $p = \frac{d}{dt}$;

i_t, e_t — ток и напряжение в обмотке возбуждения;

i_q — ток в демпферной обмотке;

θ — угол, определяющий пространственное положение ротора.

При этом введены те же упрощения, которые были изложены в упомянутой работе.

Решая уравнение токов в обмотке возбуждения относительно приложенного к обмотке возбуждения напряжения, имеем:

$$
\begin{aligned}
i_t &= \frac{e_t}{z_t} + \frac{\frac{3}{2} M_t (i_f + i_b)}{z_t} \\
i_q &= -j\,\frac{\frac{3}{2} M_t (i_b - i_f)}{z_q}
\end{aligned}
\qquad (4)
$$

Подставляя в уравнение (1) и решая, имеем:

$$
\begin{aligned}
e_f &= i_f A + i_b B + e_t C \\
e_b &= i_f D + i_b E + e_t F,
\end{aligned}
\qquad (5)
$$

где

$$
\begin{aligned}
A &= r + [p + j(p\theta)]\left[L_f - \frac{\frac{3}{2} pM_t^2}{2z_t} - \frac{j\frac{3}{2} pM_{qk}^2}{2z_{qk}}\right] \\
B &= [p + j(p\theta)]\left[L_f - \frac{\frac{3}{2} pM_t^2}{2z_t} + j\,\frac{\frac{3}{2} pM_{qk}^2}{2z_{qk}}\right] \\
C &= [p + j(p\theta)]\,\frac{M_t}{2z_t} \\
D &= [p - j(p\theta)]\left[L_b - \frac{\frac{3}{2} M_t^2}{2z_t} + \frac{j\frac{3}{2} pM_{qk}^2}{2z_{qk}}\right] \\
E &= r + [p - j(p\theta)]\left[L_f - \frac{\frac{3}{2} M_t^2}{2z_t} - j\,\frac{\frac{3}{2} pM_{qk}^2}{2z_{qk}}\right] \\
F &= [p - j(p\theta)]\,\frac{M_t}{2z_t}.
\end{aligned}
\qquad (6)
$$

Величины A, B, C, D, E, F являются переходными импеданцами машин.

r, z_t, z_{qk} — омические сопротивления фазы, обмотки возбуждения и к-з цепи по поперечной оси;

L_f, L_b, M_{qk}, M_t — соответствующие индуктивности.

Уравнения определяют процессы работы всех возможных включений синхронной машины в любой автоматической схеме с любым режимом работы, как стационарным, так и не стационарным. Они дают возможность определить токи, если задана функция $(p\theta) = \frac{d\theta}{dt}$.

Эта функция может быть определена из уравнения, характеризующего механический режим работы ротора

$$Jp^2\theta + kp\theta + T = M,$$

где

J — момент инерции ротора;
k — коэфициент трения;
M — внешний момент нагрузки;
T — электромагнитный момент на роторе.

Как указано в упомянутой работе, выражения мгновенного электромагнитного момента, действующего на ротор машины, в осях $(1, j)$ или в осях (d, q) имеют вид:

$$T = \frac{3}{2}\left[2L_b\, j\,(i_b - i_f)(i_f + i_b) + M_t\, i_t\, j\,(i_b - i_f) + M_{qk} i_{qk} j\right](i_f + i_d)$$

$$T = \frac{3}{2}\left[M_t\, i_t\, i_q + 2L_b\, i_d\, i_q + M_{qk}\, i_k\, i_d\right]. \qquad (7)$$

Если токи будут получены в виде векторов, необходимо в выражении (7) взять скалярные произведения токов.

Пользуясь полученными уравнениями индивидуальной машины, рассмотрим параллельную работу синхронных машин в схеме передачи угла и движения.

Рассматриваемая схема состоит из двух параллельно включенных синхронных машин: „датчика" и „приемника". Мгновенные напряжения и токи датчика обозначим: I_a, I_b, I_c и E_a, E_b, E_c, приемника: i_a, i_b, i_c и e_a, e_b, e_c.

К обмоткам возбуждения „датчика" и „приемника" приложено напряжение e_t, мгновенное значение которого задано уравнением:

$$e_t = E_m \cos \omega t.$$

Токи и напряжения рассматриваемых машин связаны нижеизложенными уравнениями, полученными из закона Кирхгофа:

$$\begin{aligned} I_a &= -i_a \qquad & E_a - E_b &= e_a - e_b \\ I_b &= -i_b \qquad & E_b - E_c &= e_b - e_c \\ I_c &= -i_c \qquad & E_c - E_a &= e_c - e_a \end{aligned}$$

Для напряжений справедливы также следующие уравнения:

$$E_a = e_a + e_0$$
$$E_b = e_b + e_0$$
$$E_c = e_c + e_0$$

где

e_0 — напряжение между нулевыми точками машины.

В общем случае e_0 отлично от 0. Выражая эти зависимости в осях (1, j) путем их подстановки в уравнение вида (3), имеем:

$$E_f = e_f e^{j(\theta_2-\theta_1)} \qquad I_f = -i_f e^{j(\theta_2-\theta_1)}$$
$$E_b = e_b e^{-j(\theta_2-\theta_1)} \qquad I_b = -i_b e^{-j(\theta_2-\theta_1)}, \qquad (8)$$

где:

$$\theta_1 = \int \Omega_1 \, dt + \delta_1$$
$$\theta_2 = \int \Omega_2 \, dt + \delta_2$$

мгновенное значение углов, определяющих пространственное положение роторов синхронных машин.

Оперативное уравнение обеих машин согласно выражениям (5) представляется в следующем виде:

$$\begin{aligned} E_f &= I_f A_д + I_b B_д + e_t C_д \\ E_b &= I_f D_д + I_b E_д + e_t F_д \end{aligned} \qquad (9)$$

$$\begin{aligned} e_f &= i_f A_п + i_b B_п + e_t C_п \\ e_b &= i_f D_п + i_b E_п + e_t F_п , \end{aligned} \qquad (10)$$

где индексы „Д" и „П" относятся к одной и другой машине.

Для режима синхронного вращения обеих синхронных машин справедливы уравнения:

$$p\theta_2 = p\theta_1 = \mathrm{const} \quad \theta_2 - \theta_1 = \delta_2 - \delta_1 = \delta.$$

Задаваясь напряжением в обмотках возбуждения синхронных машин в виде вектора $\bar{e}_t$ и решая совместно уравнения (9) и (10), путем подстановки $p = j\omega$ и $(p\theta) = \Omega$ в переходные импеданцы 6, легко определить токи i_f, i_b, а так же токи I_f, I_b. Это решение дает для любого стационарного режима работы, при условии, что параметры „датчика" и „приемника" одинаковы, нижеследующие выражения токов приемной машины:

$$\bar{i}_f = -\frac{1}{2} \frac{(1-e^{j\delta})(EC - BF\cos\delta)}{AE - BD\cos^2\delta} \bar{e}_t$$
$$\bar{i}_b = -\frac{1}{2} \frac{(1-e^{-j\delta})(AF + DC\cos\delta)}{AE - BD\cos^2\delta} \bar{e}_t, \qquad (11)$$

где:

$$A = r + (1+s)\left[jx_f + \frac{\frac{3}{2}x_{at}^2}{2z_t} + \frac{\frac{3}{2}x_{qk}^2}{2z_{qk}}\right]$$

$$B = (1+s)\left[jx_b + \frac{\frac{3}{2}x_{at}^2}{2z_t} - \frac{\frac{3}{2}x_{qk}^2}{2z_{qk}}\right]$$

$$C = (1+s)\,j\,\frac{x_{at}}{2z_t} \qquad (12)$$

$$D = (1-s)\left[jx_b + \frac{\frac{3}{2}x_{at}^2}{2z_t} - \frac{\frac{3}{2}x_{qk}^2}{2z_{qk}}\right]$$

$$E = r + (1-s)\left[jx_f + \frac{\frac{3}{2}x_{at}^2}{2z_t} + \frac{\frac{3}{2}x_{qk}^2}{2z_{qk}}\right]$$

$$F = (1-s)\left[j\frac{x_{at}}{2z_t}\right]$$

$$x_f = \omega L_f = \omega(L_{cp} + M_{cp}) = \omega\left[\frac{(L_{max} - L_{min})}{2} + \frac{(M_{max} + M_{min})}{2}\right].$$

$$x_b = \omega L_b = \omega\left(\frac{3}{2}M_s\right) = \omega\frac{(M_{max} - M_{min})}{2}.$$

$$x_{at} = \omega M_t$$

$$x_{qk} = \omega M_{qk}$$

$$z_t = r_t + j\omega L_t;\; z_{qk} = r_k + j\omega L_{qk};\quad s = \frac{\Omega}{\omega};\; \omega = 2\pi f.$$

Эти выражения, как легко заметить, получены из зависимостей (6) при подстановке: $p = j\omega$; $(p\Theta) = \Omega$.

Небезынтересно отметить, что:

$$x_f + x_b = x_d$$

$$x_f - x_b = x_q$$

реактансы в омах по продольным и поперечным осям, подсчитываемые известными методами. В частном случае, когда угловые скорости синхронной машины $\Omega = 0$, т. е. когда осуществляется синхронный поворот при возбуждении обмоток возбуждения переменным током, токи i_f и i_b определяются следующими выражениями:

$$\bar{i}_f = -\frac{1}{2}\,\frac{c\left(1 - e^{+j\delta}\right)}{A - B\cos\delta}\,\bar{e}_t$$

$$\bar{i}_b = -\frac{1}{2}\,\frac{\left(1 - e^{-j\delta}\right)}{A - B\cos\delta}\,\bar{e}_t\,.$$

Переходя к токам $\bar{i}_d$ и $\bar{i}_q$, имеем

$$\bar{i}_d = \bar{i}_t + \bar{i}_b = \frac{c(1-\cos\delta)}{A - B\cos\delta}\,\bar{e}_t\,; \qquad \bar{i}_q = f(\bar{i}_b - \bar{i}_t) = \frac{-c\sin\delta}{A - B\cos\delta}\,\bar{e}_t\,.$$

Наконец, из уравнений (4) имеем:

$$\bar{i}_t = \frac{\bar{e}_t}{z_t} - \frac{\frac{3}{2}\,jx_{at}\bar{i}_d}{z_t}\,,$$

$$\bar{i}_q = \frac{\frac{3}{2}\,M_{qk}\,\bar{i}_q}{z_{qk}}\,. \tag{13}$$

Электромагнитный момент, действующий на роторы самосинхронизирующих синхронных машин, определяется по формуле:

$$T = \frac{1}{\omega}\,\frac{3}{2}\left[x_{at}\bar{i}_t\cdot\bar{i}_q + 2x_b\bar{i}_d\cdot\bar{i}_q + x_{qk}\bar{i}_d\cdot\bar{i}_q\right].$$

Для расчета рабочих характеристик необходимо определить значение импедансов A, B, C, D, E, F при различных скоростях вращения от $s=0$ до $s=\pm\infty$ и заданных углах рассогласования.

Определив для каждой скорости соответствующие величины токов по уравнению (11), можно построить рабочие характеристики машин при различных оборотах.

Следует отметить, что в том случае, когда напряжение на обмотках возбуждения обеих синхронных машин задается не в виде вектора $\bar{e}_t$, а в виде постоянного напряжения E_0, рассмотренные выше уравнения справедливы для случая параллельной работы двух синхронных генераторов и, следовательно, эти уравнения, а также выражения моментов дают возможность анализировать параллельную работу двух синхронных машин, как в стационарном, так и в нестационарном режиме. Очевидно, что этот метод может быть применен к любому количеству машин.

Научно-исследовательский институт
Министерства электропромышленности СССР
Москва, 1946, июнь.

Ա. Ղ. ԽՈՍՐՈՖՅԱՆ

Ինքնասինխրոնիզացվող սինխրոն մեքենաների տեսությունը.
1. Սինխրոն մեքենաների զուգահեռ աշխատանքը անկյան եվ շարժման փոխանցման սխեմաներում

Սինխրոնիզացվող սիստեմների կիրառման բազմակողմանիությունը բերում է սինխրոն մեքենաների միացմանը՝ սկզբունքորեն տարբեր սխեմաների ավտոմատիկ սարքավորումներում.

Միացման ամենատարածված տիպիկ սխեմաները հետևյալներն են՝ անկյան և շարժման սինխրոն փոխանցման ինքնասինխրոնիզացվող սխեմաները միաֆազ և եռաֆազ գըր-

գըռման դեպքում, եռաֆազ մեքենայի աշխատանքը լարման վերափոխիչից, կրկնակի սըն-ման մեքենայի աշխատանքը էլեկտրական դիֆերենցիալի ռեժիմում, սինխրոն մեքենաների աշխատանքը ուժային շարժման տիրատրոնային և լամպային սխեմաներում, սինխրոն գե-ներատորների զուգահեռ աշխատանքը որպես ինքնասինխրոնիզացվող սինխրոն մեքենա-ների մասնակի դեպք։

Ընդհանրապես, շատ քիչ ուսումնասիրված ինքնասինխրոնիզացվող սինխրոն մեքե-նաների աշխատանքի վերլուծման համար, երբ այդ մեքենային կցված է ցանկացած լա-րում, ամենադիտանի մեթոդը — դա փոփոխական ինդուկտիվություններ ունեցող ընդհանուր տրանսֆորմատորի թեորիայի վրա հիմնված մեթոդն է։ Այդ մեթոդը մեր կողմից կիրառ-ված է սինխրոն մեքենայի վերափոխման հավասարումների անալիզի համար։

Օգտվելով ինդուկտիվության մեքենայի ստացված հավասարումներից, դիտարկվում է սինխրոն մեքենաների զուգահեռ աշխատանքը շարժման և անկյան փոխանցման սխեմա-յում։

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

1. *А. Г. Иосифьян*. ДАН Армянской ССР, 7, № 3, 1947.