

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Ю. М. ШАХНАЗАРЯН

ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ПРИ
 УСТАНОВИВШЕМСЯ АСИНХРОННОМ РЕЖИМЕ
 ГИДРОГЕНЕРАТОРА*

Длительное время асинхронные режимы в электрических системах считались недопустимыми, ввиду их нежелательного воздействия на энергосистему и недостаточной их изученности.

В настоящее время в энергосистемах допускаются режимы, в которых отдельные возбужденные генераторы или группы генераторов некоторое время работают несинхронно. При этом параметры режима системы в целом или отдельных ее участков могут претерпевать значительные изменения.

Для выяснения допустимости таких режимов необходимо знать как токи в отдельных участках электрической системы, так и напряжения на отдельных ее элементах. Наличие сложной связи между параметрами режима, параметрами машины и системы не позволяют получить строгих решений получающихся уравнений. В большинстве случаев приходится ограничиваться упрощенным решением задачи, дающим общую приближенную характеристику режима.

Асинхронный режим является колебательным процессом, вызывающим периодические колебания токов, напряжений, активной и реактивной мощности. Эти колебания отрицательно влияют на работу потребителей электрической энергии и на устойчивость параллельной работы входящих в энергосистему станций.

Рассмотрим режим работы генератора с продольно-поперечными успокоительными обмотками на системы большой мощности при наличии промежуточной нагрузки, рис. 1. С целью упрощения будем считать параметры генератора и передачи линейными. Не будем учитывать насыщение машины. Скольжение будем считать положительным при скорости ротора ниже синхронной.

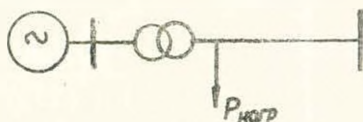


Рис. 1. Принципиальная схема.

* Настоящая статья отражает работу, выполненную автором на кафедре электрических систем, МЭИ под руководством проф. В. А. Веникова.

Для явнополюсного генератора приближенное выражение тока получим [1] через составляющие:

$$\left. \begin{aligned} I_d &= \frac{1}{1 + \frac{x_d - x_q}{Z_{11}}} \cos \alpha_{11} \left[\frac{E_d}{Z_{11}} \cos \alpha_{11} + \frac{E_q}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} - \frac{U}{Z_{12}} \cos (\delta - \alpha_{12}) \right] \\ I_q &= \frac{E_d}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} - \frac{E_q}{Z_{11}} \cos \alpha_{11} + \frac{U}{Z_{12}} \sin (\delta - \alpha_{12}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь в поперечной составляющей член $I_d \cdot \frac{x_d - x_q}{Z_{11}} \sin \alpha_{11}$ опущен.

При асинхронном режиме, вследствие перемещения ротора генератора относительно поля системы, в роторных контурах наводятся э. д. с. Наводимые э. д. с. определяются согласно уравнений Парка-Гореза. Вводя ряд упрощающих допущений и предполагая, что постоянная времени обмотки возбуждения значительно превышает постоянные времени успокоительных обмоток [2-3] при постоянстве скольжения будем иметь:

$$\begin{aligned} \Delta E_d &= -\frac{U}{Z_{12}} \cdot \frac{x_d - x_d'}{1 - \frac{x_q - x_d'}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}} \cdot \frac{ST_d'}{1 + (ST_d')^2} \sin (\delta - \alpha_{12}) - \\ &- \frac{U}{Z_{12}} \cdot \frac{x_d - x_d'}{1 - \frac{x_q - x_d'}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}} \cdot \frac{(ST_d')^2}{1 + (ST_d')^2} \cos (\delta - \alpha_{12}) \\ \Delta E_{d1} &= -\frac{U}{Z_{12}} \cdot \frac{x_d - x_d'}{\left(1 - \frac{x_q - x_d'}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}\right) \left(1 - \frac{x_q - x_d'}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}\right)} \cdot \\ &\cdot \frac{ST_d'}{1 + (ST_d')^2} \sin (\delta - \alpha_{12}) - \\ &- \frac{U}{Z_{12}} \cdot \frac{x_d - x_d'}{\left(1 - \frac{x_q - x_d'}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}\right) \left(1 - \frac{x_q - x_d'}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}\right)} \cdot \\ &\cdot \frac{(ST_d')^2}{1 + (ST_d')^2} \cos (\delta - \alpha_{12}) \\ \Delta E_{q1} &= \frac{U}{Z_{12}} \cdot \frac{x_q - x_q'}{1 - \frac{x_q - x_q'}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}} \cdot \frac{ST_q'}{1 + (ST_q')^2} \cos (\delta - \alpha_{12}) + \\ &+ \frac{U}{Z_{12}} \cdot \frac{x_q - x_q'}{1 - \frac{x_q - x_q'}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}} \cdot \frac{(ST_q')^2}{1 + (ST_q')^2} \sin (\delta - \alpha_{12}). \end{aligned} \quad (2)$$

где ΔE_d , ΔE_{d1} , ΔE_{q1} э. д. с. наводимые в обмотке возбуждения и в успокоительных обмотках.

С учетом наводимых э. д. с. уравнение токов (1) запишем:

$$I_d = \frac{1}{1 + \frac{x_d - x_q}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}} \left[\frac{F_d}{Z_{11}} \cos \alpha_{11} + \frac{\Delta E_d}{Z_{11}} \cos \alpha_{11} + \frac{\Delta E_{d1}}{Z_{11}} \cos \alpha_{11} - \right. \\ \left. - \frac{\Delta E_{q1}}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} - \frac{U}{Z_{12}} \cos (\delta - \alpha_{12}) \right], \\ I_q = \frac{E_d}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{\Delta E_d}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{\Delta E_{d1}}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} - \frac{\Delta E_{q1}}{Z_{11}} \cos \alpha_{11} + \\ + \frac{U}{Z_{12}} \sin (\delta - \alpha_{12}). \quad (3)$$

Для простоты дальнейшей записи обозначим:

$$a = \frac{x_d - x_d'}{1 - \frac{x_q - x_d'}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}}, \quad c = \frac{x_q - x_q'}{1 - \frac{x_q - x_q'}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}}, \\ b = \frac{x_d - x_d'}{\left(1 - \frac{x_q - x_d'}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}\right) \left(1 - \frac{x_q - x_d'}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}\right)}.$$

Подставляя зависимости (2) в уравнение (3) и учитывая соответствующие обозначения, после преобразований получим:

$$I_d = \frac{1}{1 + \frac{x_d - x_q}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}} \left\{ \frac{F_d}{Z_{11}} \cos \alpha_{11} - \frac{U}{Z_{12}} \left[\frac{a}{Z_{11}} \cdot \frac{ST_d}{1 + (ST_d)^2} \cos \alpha_{11} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{b}{Z_{11}} \cdot \frac{ST_d}{1 + (ST_d)^2} \cos \alpha_{11} - \frac{c}{Z_{11}} \cdot \frac{(ST_q)^2}{1 + (ST_q)^2} \sin \alpha_{11} \right] \sin (\delta - \alpha_{12}) - \right. \\ \left. - \left[\frac{U}{Z_{12}} \cdot \frac{a}{Z_{11}} \cdot \frac{(ST_d)^2}{1 + (ST_d)^2} \cos \alpha_{11} + \frac{b}{Z_{11}} \cdot \frac{(ST_d)^2}{1 + (ST_d)^2} \cos \alpha_{11} + \frac{c}{Z_{11}} \cdot \right. \right. \\ \left. \left. \cdot \frac{ST_q}{1 + (ST_q)^2} \sin \alpha_{11} + 1 \right] \cos (\delta - \alpha_{11}) \right\}, \\ I_q = \frac{E_d}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} - \frac{U}{Z_{12}} \left[\frac{a}{Z_{11}} \cdot \frac{ST_d}{1 + (ST_d)^2} \sin \alpha_{11} + \frac{b}{Z_{11}} \cdot \right. \\ \left. \cdot \frac{ST_d}{1 + (ST_d)^2} \sin \alpha_{11} + \frac{c}{Z_{11}} \cdot \frac{(ST_q)^2}{1 + (ST_q)^2} \cos \alpha_{11} - 1 \right] \sin (\delta - \alpha_{12}) - \\ - \frac{U}{Z_{12}} \left[\frac{a}{Z_{11}} \cdot \frac{(ST_d)^2}{1 + (ST_d)^2} \sin \alpha_{11} + \frac{b}{Z_{11}} \cdot \frac{(ST_d)^2}{1 + (ST_d)^2} \sin \alpha_{11} - \frac{c}{Z_{11}} \cdot \right. \\ \left. \cdot \frac{ST_q}{1 + (ST_q)^2} \cos \alpha_{11} + 1 \right] \cos (\delta - \alpha_{11}). \quad (4)$$

$$\left. \frac{ST_q''}{1+(ST_q'')^2} \cos \alpha_{11} \right| \cos (\delta - \alpha_{12}). \quad (4)$$

Обозначая выражение в квадратных скобках перед $\sin (\delta - \alpha_{12})$ через $D_1(s)$ и выражение в квадратных скобках перед $\cos (\delta - \alpha_{12})$ через $D_2(s)$ — в продольном составляющем тока и соответственно $D_3(s)$ и $D_4(s)$ в поперечном составляющем тока, получим:

$$\begin{aligned} I_d = & \frac{E_d}{Z_{11} \left(1 + \frac{x_d - x_q}{Z_{11}} \cos \alpha_{11} \right)} \cos \alpha_{11} - \\ & \frac{U}{Z_{12} \left(1 + \frac{x_d - x_q}{Z_{11}} \cos \alpha_{11} \right)} \{ D_1(s) \sin (\delta - \alpha_{12}) + \\ & + D_2(s) \cos (\delta - \alpha_{12}) \}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$I_q = \frac{E_d}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} - \frac{U}{Z_{12}} \{ D_3(s) \sin (\delta - \alpha_{12}) + D_4(s) \cos (\delta - \alpha_{12}) \}.$$

Уравнение (5) может быть представлено в виде:

$$\begin{aligned} I_d = & \frac{E_d}{Z_{11} \left(1 + \frac{x_d - x_q}{Z_{11}} \cos \alpha_{11} \right)} \cos \alpha_{11} - A \sin (\delta - \alpha_{12} + \alpha), \\ I_q = & \frac{E_d}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} - B \sin (\delta - \alpha_{12} + \beta), \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} A = & \frac{U}{Z_{12} \left(1 + \frac{x_d - x_q}{Z_{11}} \cos \alpha_{11} \right)} \sqrt{D_1^2(s) + D_2^2(s)}, \\ B = & \frac{U}{Z_{12}} \sqrt{D_3^2(s) + D_4^2(s)}, \\ \alpha = & \arctg \frac{D_2(s)}{D_1(s)}, \\ \beta = & \arctg \frac{D_4(s)}{D_3(s)}. \end{aligned}$$

Уравнение (6) представляет собой уравнение эллипса в параметрическом виде, центр которого не совпадает с началом координат. Геометрическим местом конца вектора тока, как это видно из приведенного рисунка 2, является эллипс, диаметры которого:

$$\begin{aligned} 2a = & \sqrt{A^2 + B^2 + 2AB \sin (\beta - \alpha)} + \sqrt{A^2 + B^2 - 2AB \sin (\beta - \alpha)}, \\ 2b = & \sqrt{A^2 + B^2 + 2AB \sin (\beta - \alpha)} - \sqrt{A^2 + B^2 - 2AB \sin (\beta - \alpha)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Положение эллипса определяется углом γ образуемый большой осью с координатной осью q

$$\gamma = \arctg \frac{A^2 - B^2 + \sqrt{(A^2 - B^2)^2 + 4A^2B^2 \cos^2(\beta - \alpha)}}{2AB \cos(\beta - \alpha)} \quad (8)$$

Уравнение (6) представляет кривую биения, где половина максимума биения определяется отрезком прямой от начала координат до максимальной точки эллипса и соответственно половина минимума кривой биения — отрезком до минимальной точки эллипса (рис. 2).

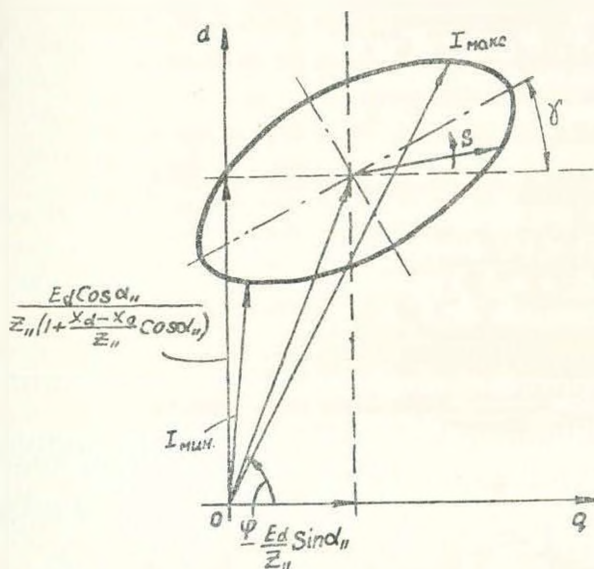


Рис. 2. Эллипс токов.

При невозбужденном генераторе и закороченной обмотке возбуждения, центр эллипса совпадает с началом координат и максимум и минимум кривой биения определяются большим и малым полуэллипсами эллипса.

Следовательно для того чтобы получить полные значения тока генератора в асинхронном режиме с постоянным скольжением на токи эллипса определяемые при работе генератора с короткозамкнутой обмоткой возбуждения, должны быть наложены токи режима получающиеся при работе генератора на шины с напряжением равным нулю.

Составляющие падения напряжения в линии можно определить умножив уравнение (5) на соответствующее сопротивление до точки, где хотим определить напряжение, при этом надо учесть и угол внешнего сопротивления.

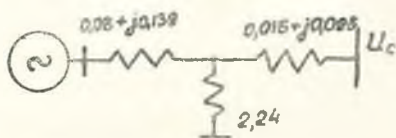


Рис. 3.

Расчетная схема электропередачи.

Параметры генератора $x_d = 0,516$,

$x_q = 0,322$, $x'_d = 0,180$, $x'_q = 0,137$

$T_{d0} = 5,5$ сек., $T'_{d0} = 0,0255$ сек.,

$T'_{q0} = 0,0112$ сек. Сопротивления отнесены к напряжению 430 вольт.

Запишем величину напряжения на зажимах нагрузки (рис. 1) в виде:

$$U_{дн} = E_d - \frac{E_d \cdot Z_{bn} \cos \alpha_{11}}{Z_{12} \left(1 + \frac{x_d - x_q}{Z_{11}} \cos \alpha_{11} \right)} - A' \sin (\delta - \alpha'_{12} + \alpha'),$$

$$U_{qn} = \frac{E_d}{Z_{11}} Z_{bn} \cdot \sin \alpha_{11} - B' \sin (\delta - \alpha'_{12} + \beta').$$
(9)

Величины A' , B' , α' и β' — определяются также, как и выше, но при их определении надо учитывать и внешнее сопротивление. Здесь Z_{bn} — полное сопротивление до точки нагрузки, включая и реактивное сопротивление генератора. В углах α_{11} и α_{12} учтено и внешнее сопротивление.

Положение эллипса напряжений и его диаметры определяются по формулам (7) и (8) с соответствующей заменой величин A' , B' , α' и β' вместо A , B , α и β . Уравнение (9) представляет кривую биения аналогично уравнению (6).

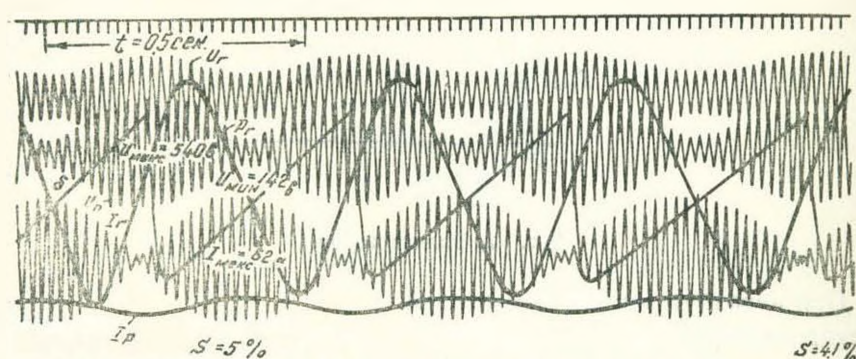


Рис. 4. Осциллограмма опыта установившегося асинхронного хода.

Не трудно представить, что для каждого значения скольжения будем иметь свой эллипс тока и напряжения.

Результаты проведенных расчетов и их сравнение с экспериментальными данными показали, что определение токов и напряжений в установившемся асинхронном режиме с достаточной для практики точностью может производиться по изложенной методике.

При работе генератора на длинную линию передачи, машину можно приближенно считать симметричной в электрическом и магнитном отношениях, что существенно облегчает расчет [4].

Предлагаемая методика расчета может быть успешно применена для расчета асинхронного хода в сложной системе, в частности при асинхронном ходе станции из трех и более станций и определение напряжения в узловой точке — определяющей устойчивость оставшихся в синхронизме станций.

В качестве примера в таблице приведено сопоставление результатов экспериментальных и расчетных значений токов и напряжений

Таблица

Нормальный режим				Режим асинхронного хода														
P_r	Q_r	U_r	U_c	s	φ град	γ град	I_1 при $U_c=0$	I_2 при $E_r=0$	$I_{\max.}$		φ' град	γ' град	$U_{1н}$ при $U_c=0$	$U_{2н}$ при $E_r=0$	$U_{н \max.}$		$U_{н \min.}$	
									расчет.	опыт.					расчет.	опыт	расчет.	опыт
0,486	0,093	1,02	0,996	0,10	80°30'	90°	1,51	1,92	3,40	3,37	89°	86°	0,515	0,915	1,40	1,34	0,410	0,397
				0,05	80°	90°	1,39	1,89	3,25	3,10	89°	86°	0,500	0,895	1,39	1,25	0,39	0,330
				0,03	80°	90°	1,33	1,87	3,15	3,02	89°	86°	0,500	0,890	1,38	1,25	0,39	0,330
				0,01	80°	90°	1,32	1,85	3,10	—	89°	86°	0,500	0,890	1,38	—	0,39	0,330
				0,005	80°	90°	1,32	1,85	3,10	—	89°	86°	0,500	0,890	1,38	—	0,39	0,330

для схемы рис. 3, при установившемся асинхронном ходе генератора не имеющего автоматического регулятора возбуждения.

Расчеты и измерения тока генератора и напряжения на нагрузке приведены для ряда установившихся скольжений генератора. Опытные данные для скольжения ниже $s=0,03$ не приведены в таблице так как при этих скольжениях генератор начинает втягиваться в синхронизм.

На рис. 4 для сопоставления приведена осциллограмма установившегося асинхронного хода генератора расчетной схемы при скольжении $s=0,05$.

Работа проводилась в Московском энергетическом институте на кафедре электрических систем.

Московский энергетический институт

Поступило 25 IV 1961

ՀԱՅ. Մ. ՇԱՆՆԱԶԱՐՅԱՆ

ՀՈՍԱՆՔՆԵՐԸ ԵՎ ԿԱՌԱՄՆԵՐԸ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՍԻՍՏԵՄՈՒՄ
ՀԻՊՐՈԳՆԵՐԱՏՈՐՆԵՐԻ ԿԱՅՈՒՆԱՅԱԾ ԱՍԻՆԽՐՈՆ ՌԵՋԻՄԻ ԳԵՊԲՈՒՄ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Աշխատությունում ուսումնասիրված է միջանկյալ բեռնավորումով, անփոփոխ լարման շինանների միացված, հիդրոգեններատորի կաշունացած ասինխրոն ռեժիմը: Որոշակի ենթադրություններով, օգտվելով Պարկ-Գորեի հայտնի հավասարումից, դուրս է բերված գեներատորի հոսանքների և բեռնավորման սեղմակներում լարման հավասարումները (6) և (9):

Ցույց է տրված, որ այս հավասարումները իրենցից ներկայացնում են էլիպսի հավասարումը պարամետրիկ աեսքով, որի կենտրոնը չի համընկնում կոորդինատների սկզբի հետ: Էլիպսի հավասարումները (6) և (9) բոտ ժամանակի իրենցից ներկայացնում են բարախման կորը, որտեղ բարախման մաթրիմումի կեսը որոշվում է ուղիղ հատվածով, սկսած կոորդինատների սկզբից՝ մինչև էլիպսի մաթրիմում հեռացված կետը և համապատասխանորեն բարախման կորի մինիմումի կետը, ապա ուղիղ հատվածով՝ սկսած կոորդինատների սկզբից մինչև էլիպսի մինիմում հեռացված կետը:

Բերված աղյուսակից, որտեղ արտացոլված են հաշվման և էքսպերիմենտալ արդյունքները՝ կատարված իրենիքետ սխեմայի համար (նկ. 3), երևում է, որ առաջարկված բանաձևերը տալիս են պրակտիկ հաշվումների համար բավականին ընդունելի արդյունքներ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Лебедев С. А. и Жданов П. С. Устойчивость параллельной работы электрических систем. Госэнергоиздат, 1934.
2. Веников В. А. Дальние электропередачи, Госэнергоиздат, 1960.
3. Веников В. А. и Жуков Л. А. Переходные процессы в электрических системах. Госэнергоиздат, 1953.
4. Мамиконянц Л. Г., Совалов С. А., Хачатуров А. А. Асинхронные режимы, не-синхронные включения и ресинхронизация генераторов Куйбышевской ГЭС. „Электричество“, № 11, 1957.
5. Урусов И. Д. Линейная теория колебаний синхронной машины. Издательство АН СССР, 1960.