

Ю. М. ШАХНАЗАРЯН

УПРОЩЕННЫЕ ПРИЕМЫ ПРИБЛИЖЕННЫХ РАСЧЕТОВ АСИНХРОННОГО РЕЖИМА СТАНЦИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ*

Современная методика расчетов переходных процессов в электрической системе при разных нарушениях режима должна заключаться не только в расчетах устойчивости при первом вылете угла (динамическая устойчивость), но и должна давать возможность более широкого исследования поведения системы при проведении в ней различных мероприятий по повышению устойчивости [1, 2]. Эта методика должна предусматривать возможность расчета асинхронного хода и ресинхронизации с целью обеспечения результирующей устойчивости системы**.

Электрические системы должны быть рассчитаны на допустимость таких режимов, при которых надо учитывать широкое применение автоматического регулирования пропорционального и сильного действия.

Эта методика должна принимать во внимание особенности современных регулируемых систем и должна возможно более полно и тщательно учитывать действие устройств автоматического регулирования возбуждения (АРВ), скорости (АРС) и других (например, торможения).

При расчетах токов и напряжений при асинхронном ходе в автоматически регулируемых системах возникает вопрос, какими параметрами необходимо замещать генератор в этом режиме, а именно: каким реактивным сопротивлением и какой э. д. с. за этим сопротивлением необходимо представить генератор в схеме замещения во время асинхронного хода. Надо заметить, что знание этой величины также необходимо для определения синхронной мощности входящей в общие выражения активной и реактивной мощности синхронной машины, работающей в асинхронном режиме.

Следовательно, при исследовании асинхронного хода в первую очередь необходимо определить величины реактивного сопротивления

* Н стоящая статья отражает работу, выполненную автором на кафедре электрических систем Московского энергетического института под руководством профессора В. А. Веникова.

** Под результирующей устойчивостью понимается способность системы продолжать работу и снабжать потребителя электрической энергией после аварий, сопровождающихся кратковременным асинхронным ходом отдельных станций с последующей их ресинхронизацией.

Δx и э. д. с. E_x за реактивным сопротивлением, замещающим машину при ее установившемся асинхронном режиме.

Уравнение тока гидрогенератора, работающего в установившемся асинхронном режиме через сложную связь с шинами неизменного напряжения, с известными допущениями может быть записано так:

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

Здесь в величинах A и B отражены все э. д. с., наведенные за счет носительных поворотов ротора машины. Графически это уравнение может быть представлено эллипсом, смещенным от начала координат (рис. 1) [3]. Величину максимального значения тока можно графически определить, строя этот эллипс при заданном значении скольжения и определяя расстояние от начала координат до наиболее удаленной точки эллипса.

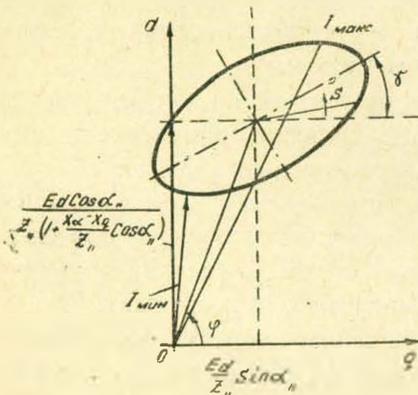


Рис. 1. Эллипс токов.

Зависимость $E_r = f(x_r)$, построенная для нормального режима, и графическое решение обоих уравнений дает искомые величины. В качестве исследуемой схемы была принята схема рис. 2. При данных параметрах генератора и передачи угол, определяющий положение эллипса к координатной оси q , $\gamma = 90^\circ$. Мал и импедансный угол α_{11} , при этом можем записать выражение максимального тока биения в виде:

$$I_{\max} = \left. \frac{E_x}{\sqrt{3} Z_{11}(\Delta x)} + \frac{U}{\sqrt{3} Z_{12}(\Delta x)} \dots \right\} \quad (2)$$

В величине I_{\max} , которая берется из осциллограмм, учтены все э. д. с. благодаря относительному движению ротора. Исследование проводилось как для генератора снабженного АРВ пропорционального дей-

* Экспериментальные исследования проводились в проблемной лаборатории энергосистем МЭИ автором совместно с инженером Хе Ян-Цзяном.

ствия, так и для АРВ сильного действия; параметры линии передачи и генератора оставались теми же самыми. Компаудирование принималось нормальным, т. е. обеспечивающим номинальный режим возбуждения при полной нагрузке. Регулятор сильного действия осуществлял регулирование возбуждения генератора по следующим параметрам: отклонению напряжения генератора и его первой производной, отклонению тока линии и его первой и второй производным. Коэффициенты регулирования выбирались по условиям наилучшего затухания при малых отклонениях. Изменение величины E_x и $Z_{11} = f(\Delta x)$ от скольжения решается просто: для генератора снабженного АРВ обоих типов величина максимального значения тока не меняется в довольно широком диапазоне скольжений ($s = 0.025 \div 0.10$)*.

Это показывает, что искомые величины от скольжения изменяются почти одинаково и их отношение остается постоянным.

Следовательно, величины E_x и Δx остаются неизменными на этом диапазоне скольжений. Второй член уравнения (2), как известно, от скольжения не зависит. Для генератора без АРВ величина максимального тока от изменения скольжения не остается постоянной, и для каждого скольжения необходимо брать свое значение максимального тока, что показывает непостоянство искомых величин от скольжения.

Для нормального режима определяются э. д. с. $E_q, E_d, E_d \dots \dots E_x$ за соответствующими сопротивлениями. Далее, на построенную зависимость $E_r = f(x_r)$, полученную из нормального режима, накладывается зависимость $E_x = f(\Delta x)$, найденная по данным установленного асинхронного режима в соответствии с формулой (2) при $I_{\text{макс}}$, U, Z_{11}, Z_{12} , взятых по данным опыта (с учетом Δx , которыми мы задались). Меняя Δx и полагая его соответственно x_q, x_d, x_d и т. д., находим E_x и строим характеристики, показанные на рис. 3 и 4, графически определяя искомое Δx .

Для схемы рис. 2 была проделана серия расчетов для случая, когда генератор снабжен АРВ сильного действия, пропорционального действия и без него. Результаты сведены в табл. 1, 2 и 3. В таблицах E_q, E_d, E_d и т. п. — э. д. с., найденные из нормального режима. $E_{\Delta x}$ — величина э. д. с., полученная из формулы (2) при подстановке в величины Z_{11} и Z_{12} соответствующих значений сопротивлений генератора.

В таблицах приведены наиболее характерные э. д. с., определяющие зону

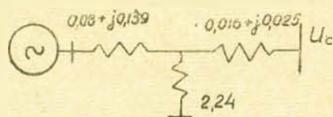
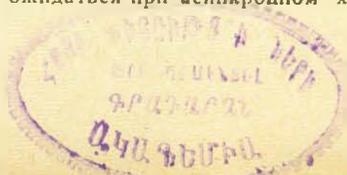


Рис. 2. Исследуемая схема электропередачи. Параметры генератора: $x_d = 0,516, x_q = 0,332, x'_d = 0,180, x'_q = 0,137, T_d = 5,5 \text{ сек}, T'_d = 0,0255 \text{ сек}, T'_q = 0,0112 \text{ сек}.$

Сопротивления отнесены к напряжению 430 вольт, данные нормального режима приведены в табл. 1, 2 и 3.

* Значения, которые могут ожидать при асинхронном ходе гидрогенератора в энергосистеме.



пересечения характеристик нормального и асинхронного режимов. Построение этих зависимостей приведено на упомянутых рис. 3 и рис. 4.

Как видно из таблиц, для генераторов, снабженных АРВ, при асинхронном ходе сохраняется постоянство переходного сопротивления и переходной э. д. с. за ним.

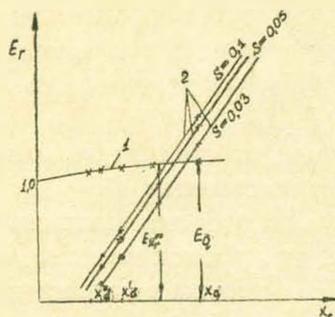


Рис. 3. Определение сопротивления и э. д. с., заменяющих генератор при асинхронном ходе при отсутствии АРВ (режим 2).

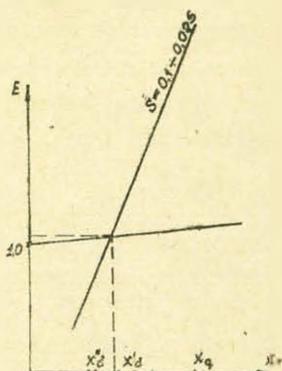


Рис. 4. Определение сопротивления и э. д. с., заменяющих генератор при асинхронном ходе при наличии АРВ сильного действия (режим 3).

Расчеты результирующей устойчивости в предположении постоянства э. д. с., за переходным сопротивлением (для генераторов с АРВ), что эквивалентно допущению постоянства потокосцепления обмотки возбуждения, будут тем больше справедливы, чем больше постоянная времени обмотки возбуждения.

Таблица 1

Номера режимов	P_r (в д/ед)	Q_r (в д/ед)	U_r (в д/ед)	U_c (в д/ед)	Генератор с сильным АРВ		
					$s = 0,025 - 0,10$		
					$\frac{E_q}{E_{\Delta x - x_q}}$	$\frac{E_d^*}{E_{\Delta x - x'd}}$	$\frac{E_d^*}{E_{\Delta x - x'd}}$
1	0,640	0,345	1,12	1,01	$\frac{1,25}{1,69}$	$\frac{1,186}{1,12}$	$\frac{1,164}{0,930}$
2	0,640	0,152	1,04	0,997	$\frac{1,115}{1,56}$	$\frac{1,065}{1,03}$	$\frac{1,042}{0,853}$
3	0,576	0,09	1,035	1,01	$\frac{1,081}{1,61}$	$\frac{1,05}{1,07}$	$\frac{1,045}{0,880}$

Таблица 2

Номера режимов	P_r (в л/ед)	Q_r (в л/ед)	U_r (в л/ед)	U_c (в л/ед)	Генератор с пропорциональным АРВ		
					$z = 0,025 \div 0,1$		
					$\frac{E_q}{E_{\Delta x = x_q}}$	$\frac{E'_d}{E_{\Delta x = x'_d}}$	$\frac{E''_d}{E_{\Delta x = x''_d}}$
1	0,576	0,083	1,017	0,950	1,065	1,04	1,028
					1,69	1,06	0,89
2	0,368	0,207	1,13	1,037	1,20	1,16	1,15
					1,59	1,04	0,86
3	0,640	0,317	1,11	1,00	1,23	1,16	1,14
					1,75	1,18	0,98

Таблица 3

Номера режимов	P_r (в л/ед)	Q_r (в л/ед)	U_r (в л/ед)	U_c (в л/ед)	Генератор без АРВ		
					$s = 0,1$		
					$\frac{E_q}{E_{\Delta x = x_q}}$	$\frac{E_{x_r=0,25}}{E_{\Delta x=0,25}}$	$\frac{E'_d}{E_{\Delta x = x'_d}}$
1	0,433	-0,069	0,920	0,960	0,90	0,909	0,910
					1,12	0,820	0,640
2	0,486	0,093	1,020	0,996	1,062	1,056	1,039
					1,230	1,025	0,790
3	0,520	0,124	1,040	1,00	1,085	1,080	1,055
					1,160	0,940	0,745

Продол. табл. 3

Генератор без АРВ

$s = 0,05$			$s = 0,05$		
$\frac{E_q}{E_{\Delta x = x_q}}$	$\frac{E_{x_r=0,25}}{E_{\Delta x=0,25}}$	$\frac{E'_d}{E_{\Delta x = x'_d}}$	$\frac{E_q}{E_{\Delta x = x_q}}$	$\frac{E_{x_r=0,25}}{E_{\Delta x=0,25}}$	$\frac{E'_d}{E_{\Delta x = x'_d}}$
0,90	0,909	0,910	0,909	0,909	0,910
0,960	0,760	0,580	0,920	0,720	0,530
1,062	1,056	1,039	1,062	1,056	1,039
1,19	0,970	0,750	1,114	0,900	0,700
1,085	1,080	1,055	1,085	1,055	1,080
1,13	0,906	0,710	1,080	0,860	1,670

Для генератора снабженного АРВ в асинхронном режиме можно рекомендовать пользоваться уравнениями для определения токов.

$$\left. \begin{aligned} I_d &= \frac{E_d}{Z_{11}(x_d)} \cos \alpha_{11} - A \sin (\delta - \alpha_{12} + \alpha) \\ I_q &= \frac{E_d}{Z_{11}(x_d)} \sin \alpha_{11} - B \sin (\delta - \alpha_{12} + \beta) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Уравнение напряжения на нагрузке записывается в виде:

$$\left. \begin{aligned} U_{dн} &= E_d' - \frac{E_d}{Z_{11}(x_d)} \cos \alpha_{11} \cdot Z_{вн} + A' \sin (\delta - \alpha'_{12} + \alpha') \\ U_{qн} &= E_q' - \frac{E_d}{Z_{11}(x_d)} \sin \alpha_{11} \cdot Z_{вн} + B' \sin (\delta - \alpha'_{12} + \beta'). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Здесь $Z_{вн}$ — полное сопротивление до точки, где присоединена нагрузка, включая и реактанс генератора.

E_q' — поперечная составляющая вектора E' , обычно она мала и для практических расчетов ею можно пренебречь. Расчеты тока генератора и напряжения на нагрузке для исследуемой схемы с автоматически регулируемым генератором сведены в табл. 4 и 5. Результаты расчета во многих случаях близко сходятся с результатами эксперимента.

Метод расчета [3] показан на рис. 5 и 6 для режима 3 для случая, когда генератор снабжен АРВ сильного действия. Построены эллипсы тока и напряжения при скольжении $s = 0,10$. При других скольжениях эллипсы

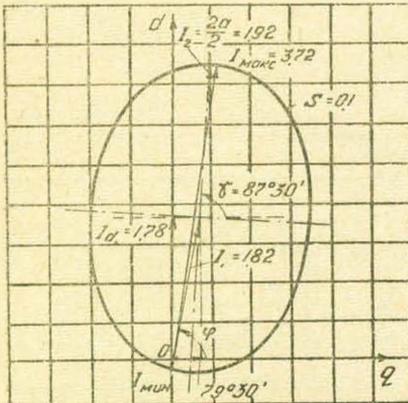


Рис. 5. Расчетная диаграмма тока генератора при асинхронном ходе с АРВ сильного действия (режим 3).

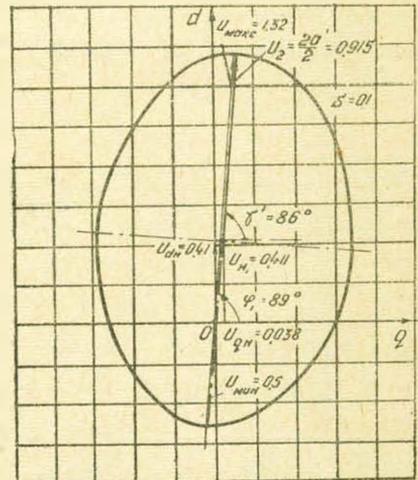


Рис. 6. Расчетная диаграмма напряжения нагрузки при асинхронном ходе генератора с АРВ сильного действия (режим 3).

очень близко расположены к данному (на рисунке не показаны), что показывает постоянство максимального тока от изменения скольжения.

Таблица 4

Расчет асинхронного хода системы с генератором, снабженным АРВ сильного действия

Номера режимов	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_{\max}		U_{\min}	
						расчет	опыт					расчет	опыт	расчет	опыт
1	0,10	79°20'	87°30'	2,06	1,92	3,85	3,74	89°	86°	0,470	0,915	1,38	1,25	0,450	0,48
	0,05	79°20'	90°	2,06	1,89	3,80	3,74	89°	90°	0,490	0,895	1,37	1,25	0,430	0,48
	0,03	79°20'	90°	2,06	1,87	3,80	3,74	89°	90°	0,495	0,890	1,36	1,25	0,420	0,48
	0,01	79°20'	90°	2,06	1,85	8,70	—	89°	90°	0,495	0,890	1,36	—	0,420	—
	0,005	79°20'	90°	2,06	1,85	8,70	—	89°	90°	0,495	0,890	1,36	—	0,420	—
2	0,10	79°	97°30'	1,82	1,92	3,72	3,5	89°	86°	0,410	0,915	1,325	1,36	0,505	0,550
	0,05	79°	90°	1,82	1,89	3,60	3,5	89°	90°	0,440	0,895	1,330	1,36	0,450	0,550
	0,03	79°	90°	1,82	1,87	3,60	3,5	89°	90°	0,440	0,890	1,330	1,36	0,450	0,550
	0,01	79°	90°	1,32	1,85	3,60	—	89°	90°	0,440	0,890	1,330	—	0,450	—
	0,005	79°	90°	1,82	1,85	3,60	—	89°	90°	0,440	0,890	1,330	—	0,450	—

Таблица 5

Расчет асинхронного хода системы с генератором, снабженным АРВ пропорционального действия

Номера режимов	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_{\max}		U_{\min}	
						расчет	опыт					расчет	опыт	расчет	опыт
2	0,10	79°20'	87°30'	1,8	1,90	3,65	3,50	89°	86°	0,405	0,910	1,310	1,24	0,505	0,57
	0,05	79°20'	90°	1,8	1,87	3,70	3,50	89°	86°	0,435	0,890	1,325	1,24	0,455	0,57
	0,03	74°20'	90°	1,8	1,86	3,70	3,50	89°	86°	0,435	0,880	1,323	1,24	0,453	0,57
	0,01	79°20'	90°	1,8	1,83	3,70	—	89°	86°	0,435	0,880	1,323	—	0,453	—
	0,005	79°20'	90°	1,8	1,83	3,70	—	89°	86°	0,435	0,880	1,323	—	0,453	—
3	0,10	79°20'	87°30'	2,0	1,92	3,35	3,65	89°	86°	0,450	0,915	1,360	1,27	0,465	0,48
	0,05	79°20'	90°	2,0	1,89	3,76	3,65	89°	90°	0,485	0,895	1,375	1,27	0,410	0,48
	0,03	79°20'	90°	2,0	1,87	3,76	3,65	89°	90°	0,495	0,890	3,385	1,27	0,395	0,48
	0,01	79°20'	90°	2,0	1,85	3,76	—	89°	90°	0,495	0,890	1,385	—	0,395	—
	0,005	79°20'	90°	2,0	1,85	3,76	—	89°	90°	0,495	0,890	1,385	—	0,395	—

На рис. 7 построены зависимости максимальных значений тока генератора и напряжения на нагрузке при разных скольжениях для случая режима 3 с генератором, снабженным АРВ сильного действия. Как видно, величины эти при сильном регулировании от скольжения не меняются.

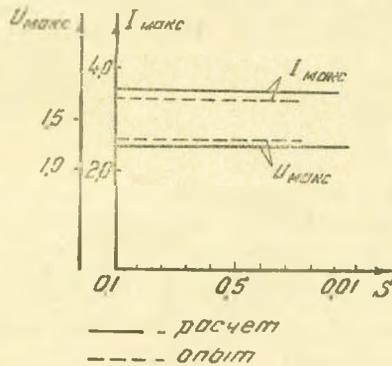


Рис. 7. Изменение величин максимального тока генератора и напряжения нагрузки от скольжения. Генератор снабжен АРВ сильного действия (режим 3).

В ы в о д ы

1. Генераторы, снабженные АРВ сильного и пропорционального действия, при расчетах асинхронного хода могут быть приближенно замещены переходным сопротивлением x_d и переходной э. д. с. за ним E_d . Такой расчет позволяет определить максимальные значения тока, мощности и соответственно напряжения в системе.

2. Генераторы, не имеющие АРВ, при больших скольжениях $s + 0,08 \div 0,20$ должны быть замещены сопротивлением, равным $(1,3 \div 1,4) x_d$, и соответствующей э. д. с., приложенной за ним.

3. При малых скольжениях меньше $s = 0,05$ генераторы могут приближенно замещаться синхронным сопротивлением x_s и э. д. с. за ним E_q .

Московский энергетический институт

Поступило 25.IV 1961

ՅՈՒ. Մ. ՇԱԽՆԱԶԱՐՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՍԵՍՏԵՄԻ ԿՈՅԱՆՆԵՐԻ ԱՍԻՆԿՐՈՆ ՌԵՃԻՄԻ ՄՈՏԱՎՈՐ ՀԱՇՎՈՒՄՆԵՐԻ ՊԱՐԶԵՑՐԱԾ ԶԵՎԵՐԸ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Հողվածում բերված է միջանկյալ բեռնավորումով, անփոփոխ լարումով շինաների միացված, կանոնավորվող զենեհատորի կալունացած ասինխրոն սեծիմը:

Կարգավորումը կատարվում է համաչափ գործողության և ուժեղ դործողության կարգավորիչներով, ռեժիմի հետևյալ կարգավորող պարամետրերով՝ դեներատորի լարման շեղման, ըստ նրա առաջին ածանցյալի և զծի հոսանքի շեղման, ըստ նրա առաջին և երկրորդ ածանցյալների: Կարգավորման գործակիցները ընտրվում են ըստ լավագույն մարման պայմանների, փոքր շեղումների դեպքում:

Կայունացած ասինխրոն ռեժիմի դեպքում, այսպիսի կարգավորվող գեներատորի համար առաջարկվում են (3) և (4) բանաձևերը, որոնք որոշում են ինչպես դեներատորի հոսանքը, այնպես էլ լարումը բեռնավորման սեղմակներում:

Աշխատանքում բերված է ունակարիվ դիմադրության և էլեկտրաշարժիչ ուժի (այդ դիմադրությունից հետո) էքսպերիմենտալ որոշման արդյունքները, ուժի, որը էլեկտրական սխեմայում փոխարինվում է դեներատորին, նրա կայունացած ասինխրոն ռեժիմի դեպքում:

Ուսումնասիրության արդյունքները բերում են հետևյալ եզրակացություններին.

1. Համաչափ կամ ուժեղ գործողության АРВ (զրգոման ավտոմատիկ կարգավորիչ) ունեցող գեներատորները ասինխրոն քայլի հաշվման դեպքում կարող են փոխարինվել անցողական դիմադրությամբ x_{σ} և անցողական էլեկտրաշարժիչ E_{σ} ուժով:

Այսպիսի հաշվումը հնարավորություն է տալիս որոշել սխեմեմի մաքսիմալ հոսանքի արժեքը, հզորությունը և համապատասխան լարումը:

2. АРВ չունեցող գեներատորները $s = 0,08 \div 0,2$ մեծ սահմանների դեպքում, պետք է փոխարինվեն $(1,3 \div 1,4) x_{\sigma}$ դիմադրությամբ և նրանից հետո կիրառված համապատասխան էլեկտրաշարժիչ ուժով:

3. $s = 0,05$ փոքր սահմանների դեպքում գեներատորները կարող են մոտավորապես փոխարինվել x_{σ} սինխրոն դիմադրությամբ և E_{σ} էլեկտրաշարժիչ ուժով:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Веников В. А. Дальние электропередачи. Госэнергоиздат, 1960.
2. Веников В. А., Розанов М. Н. и Литкене И. В. Некоторые вопросы режимов и устойчивости современных автоматически регулируемых электрических систем. Техническая информация МЭИ, 1957.
3. Шахназарян Ю. М. Токи и напряжения в электрической системе при установившемся асинхронном режиме гидрогенератора. «Известия АН Армянской ССР» (сер. техн. н.), т. XIV, № 5, 1961.