

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Р. В. ОГАНЯН

НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ ПРАКТИЧЕСКОГО УЧЕТА НАСЫЩЕНИЯ
 СТАЛИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОПЕРЕЧНОГО СИНХРОННОГО
 РЕАКТАНСА

1. В большинстве работ, посвященных явнополусным синхронным машинам, влияние магнитного насыщения на синхронные реактансы x_d и x_q и величину угла внутреннего сдвига θ не рассматривается. Насыщение стали учитывается лишь при расчетном определении тока возбуждения. Однако в ряде случаев (расчет электромагнитной мощности, определение предела статической устойчивости и перегрузочной способности, расчет некоторых схем регулирования и управления и т. п.) правильные результаты могут быть получены лишь при учете влияния насыщения на x_d , x_q и θ . Имеется ряд работ, в котором дан метод определения значений x_d с учетом насыщения. В отношении x_q многие исследователи придерживались мнения, что на его величину насыщения не оказывает заметного влияния. Лишь в последнее время появились экспериментальные работы, показавшие достаточно сильную зависимость поперечного синхронного реактанса от насыщения; одновременно были предложены методы для определения насыщенных значений x_q [2, 3, 4]. Однако методы, данные в [2, 3], не отличаются простотой. Предложенный в [5] метод расчета насыщенного значения x_q , как показали исследования, для машины малой и средней мощности (до 100 квт), не дает верных результатов. Объясняется это тем, что в малых и средних машинах с уменьшением мощности уменьшается относительная величина воздушного зазора (δ), вследствие чего воздействие насыщения на величины x_d и x_q в таких машинах проявляется значительно сильнее. Ниже, в статье автора предлагаются формулы для практического расчета величины x_q с учетом насыщения применительно к малым и средним синхронным машинам.

2. Для исследования факторов, оказывающих влияние на величину x_q при насыщении, был применен графоаналитический метод построения поля в воздушном зазоре синхронной машины по результирующей кривой м. д. с. (магнитодвижущей силы), данный в [1]. Исследования проводились на опытном синхронном генераторе мощностью 28 квт. Значения м. д. с. возбуждения F_θ и угла внутреннего сдвига θ , необходимых при построении результирующей кривой м. д. с., брались из

экспериментов. Характер изменения x_c в зависимости от насыщения контролировался экспериментами на двух других синхронных генераторах явнополюсной конструкции. Реальные значения x_c определялись из векторных диаграмм Blondеля, построенных для каждого режима работы по измеренным значениям угла ψ .

Основные технические данные исследуемых машин приведены в табл. 1.

Таблица 1

Обозначение машины	Тип машины	P_n квта	U_n в	n_n об./мин	$\cos \varphi_n$	f_n Гц	x_d о.м	x_q о.м
Генератор № 1	ЕСС-52-4	6,25	230	1500	0,8	50	18,4	10,35
Генератор № 2	МСА 72 4А	15	230	1500	0,8	50	6,15	4,07
Генератор № 3	опытн.	25	300	1500	0,8	50	6,05	3,55

Проведенные графоаналитические и экспериментальные исследования позволили выявить следующие факторы, воздействующие на величину x_c при насыщении:

а) Степень насыщения магнитопровода, которую для данного уровня напряжения можно приближенно характеризовать коэффициентом

$$k_c = \frac{\text{м. д. с. по характеристике холостого хода}}{\text{м. д. с. по спрямленной части характеристики холостого хода}}$$

С возрастанием k_c величина x_c уменьшается, причем уменьшение наблюдается уже при k_c , даже незначительно отличающихся от единицы.

б) Относительная величина воздушного зазора δ/τ . В машинах с меньшими значениями δ/τ влияние насыщения на величину x_c проявляется сильнее.

в) Коэффициент полюсного перекрытия α . Чем больше α , тем больше та часть магнитного потока, которая подвержена нелинейным изменениям из-за насыщения при возрастании м. д. с. Поэтому обычно при больших α с возрастанием напряжения величина x_c уменьшается относительно быстрее.

г) Ток якоря I . Чем выше I , тем большая м. д. с. возбуждения требуется для установления напряжения данного уровня и тем насыщеннее сталь из-за возрастания потока воздушного зазора вследствие увеличения падения напряжения в обмотке якоря. Поэтому обычно с возрастанием I (при $U = \text{const}$ и $\cos \varphi = \text{const}$) значения x_c уменьшаются.

д) Коэффициент мощности.

В режимах работы с отстающим током якоря чем ниже $\cos \varphi$, тем сильнее уменьшается величина x_c при возрастании напряжения машины.

3. На основании анализа факторов, воздействующих на величину поперечного синхронного реактаса при насыщении, ниже пред-

лагается несколько формул для практического определения реальных значений x_q в различных режимах нагрузки. Как известно, ненасыщенное значение реактанса реакции якоря по поперечной оси определяется в виде

$$x_{aq} = k_a \cdot k_{ad} \cdot \frac{1 + k_s}{2} \cdot \frac{F_a}{F_2} \quad (1)$$

В ненасыщенном состоянии магнитопровода машины разность магнитных потенциалов вдоль силовой линии поля определяется только величиной м. д. с. воздушного зазора F_2 , так как проницаемость стали считается бесконечной. При наличии насыщения стали в (1) следует учесть м. д. с. стали $F_{зам}$, а также м. д. с. F'_m , обусловленную возросшим рассеянием полюсов при увеличении тока индуктора. Таким образом, для учета насыщения стали будем иметь

$$k_{ам} = \frac{F_2 + F_{зам} + F'_m}{F_2} \quad (2)$$

где указанные м. д. с. должны быть рассчитаны для величины внутренней э. д. с. (электродвижущей силы) E_i .

Для определения x_q с учетом насыщения получим

$$x_{aq} = x_1 + \frac{x_{aq}}{k_{ам}} \quad (3)$$

где x_1 — реактанс рассеяния обмотки якоря,

x_{aq} — ненасыщенное значение реактанса реакции якоря по поперечной оси.

В [4] для x_q с учетом насыщения получено

$$x_{on} = x_p \cdot \frac{x_{aq}}{1 + \frac{x_{aq}}{x_{ad}} \left(\frac{i_{ja}}{i_{jo}} - 1 \right)} \quad (4)$$

где x_p — реактанс Потье;

x_{aq} и x_{ad} — ненасыщенные значения реактансов реакции якоря;

e_{ia} — берется равной внутренней э. д. с. E_i в относительных единицах;

i_{ja} — ток возбуждения по характеристике x , x при э. д. с. e_{da} ;

i_{jo} — ток возбуждения по спрямленной характеристике x , x при напряжении U рассматриваемого режима.

В ходе исследований выяснилось, что для машин до 100 квт, эта формула не дает точных результатов. Рассмотрение соотношения синхронных реактансов в ряде машин различной мощности показало, что у малых машин отношение $x_{aq} \cdot x_{ad}$ меньше, чем у крупных. Так как малые машины, вследствие меньших значений δ в них, значительно сильнее насыщены, то для правильного учета влияния насыщения на величину x_q посредством отношения $x_{aq} \cdot x_{ad}$ в (4) следует поменять местами x_{aq} и x_{ad} . Кроме того, удобнее пользоваться по-

стоянным значением реактанса рассеяния якоря x_1 вместо реактанса. Пусть x_p , величина которого в (4) берется различной в зависимости от рассматриваемого режима работы. С учетом сказанного для определения $x_{\text{ок}}$ было получено выражение

$$x_{\text{ок}} = x_1 + \frac{x_{\text{аэ}}}{1 + \frac{x_{\text{ад}}}{x_{\text{аэ}}} \left(\frac{l_{\text{я}}}{l_{\text{фо}}} - 1 \right)}. \quad (5)$$

Выше было отмечено, что даже при незначительном увеличении k , значение x_p уменьшается. Это наводит на мысль, что поперечный синхронный реактанс при учете насыщения может быть выражен в виде

$$x_{\text{ок}} = \frac{x_p}{k_p}. \quad (6)$$

Рассмотрение и анализ экспериментальных значений x_p для трех исследуемых в различных режимах нагрузки машины позволили подобрать приближенное выражение для m в виде

$$m = \frac{x_p}{k_p - \alpha x_p} \left(\frac{k_p}{\cos \varphi} + 1 \right), \quad (7)$$

где x_p — ненасыщенное значение поперечного синхронного реактанса в относительных единицах.

I — ток якоря в относительных единицах.

В таблицах 2–4 приведены экспериментальные данные по измерению реальных значений $x_{\text{ок}}$ и расчетные значения поперечного реактанса, полученные по предложенным формулам (3), (5) и (6), для трех исследованных генераторов.

Таблица 2

Значения x_p генератора № 1

Режим		$\cos \varphi = 0.81$				$\cos \varphi = 1.0$			
		140	200	230	260	140	200	230	260
$I = 7.85a$	Метод	$U(\%)$							
	опыт	8.1	5.95	5.15	4.1	8.25	6.4	5.1	4.4
	расчет по (3)	7.5	6.2	5.5	4.4	7.6	6.4	5.64	4.7
	расчет по (5)	8.4	6.54	5.9	4.3	8.65	6.96	5.88	4.64
	расчет по (6)	7.95	5.1	4.5	3.78	8.2	5.72	5.08	4.36
$I = 15.7a$	опыт	7.7	3.25	4.35	3.5	7.8	5.8	4.9	3.95
	расчет по (3)	7.2	5.64	4.66	3.6	7.35	6.05	5.1	4.2
	расчет по (5)	7.0	5.76	4.75	3.69	7.98	6.35	5.36	4.17
	расчет по (6)	7.35	4.4	3.8	3.2	7.3	4.82	4.2	3.6

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает, что все три полученные формулы дают точность, приемлемую для практических целей.

Таблица 3

Значения x_{qm} генератора № 2

Параметры режима			x_{qm} опыт о.м	Расчет о.м		
U_a	I_a	$\cos \varphi$		по 3	по 5	по 6
230	37,6	0,81	1,28	1,28	1,4	1,25
230	30	1,0	1,4	1,63	1,73	1,55
64,3	20	0,81	3,35	3,3	3,51	3,6
64,3	15	1,0	3,88	3,54	3,72	3,78

Таблица 4

Значения x_{qm} генератора № 3

		Режим	$\cos \varphi = 0,82$				$\cos \varphi = 1,0$			
			$U (в)$							
Метод			220	260	300	330	220	260	300	330
$I = 27a$	опыт		2,7	2,26	1,72	1,41	2,87	2,4	1,83	1,41
	расчет по (3)		2,5	2,13	1,72	1,44	2,65	2,25	1,82	1,51
	расчет по (5)		2,65	2,2	1,7	1,35	2,74	2,3	1,74	1,4
	расчет по (6)		2,58	2,11	1,61	1,4	2,66	2,25	1,78	1,57
$I = 54a$	опыт		2,32	1,87	1,42	1,12	2,59	2,15	1,68	1,31
	расчет по (3)		2,42	1,98	1,50	1,18	2,45	2,1	1,7	1,38
	расчет по (5)		2,47	2,01	1,52	1,2	2,6	2,2	1,69	1,34
	расчет по (6)		2,4	1,88	1,38	1,19	2,48	1,98	1,52	1,35

Таким образом, в зависимости от требуемой точности и имеющихся в наличии расчетных или опытных данных, определение x_q с учетом насыщения может быть проведено следующими тремя способами.

а) Если известны параметры обмотки якоря r_a и x_l , м. д. с. воздушного зазора, ток возбуждения при нагрузке, то целесообразно пользоваться формулой (3). При этом точность в определении x_{qm} не выходит за пределы $\pm 10\%$. При определении же x_{qm} для режимов, напряжение которых близко к номинальному напряжению (в диапазоне $0,8-1,1 U_n$), формула (3) дает точность в пределах $\pm 6\%$. Формулой (3) удобно пользоваться при проектировании и теоретическом исследовании машины, так как все требуемые данные обычно определяются расчетчиками в процессе расчета магнитной цепи.

б) в случае отсутствия характеристики намагничивания при данной нагрузке и наличии характеристики холостого хода можно воспользоваться формулой (5).

При этом точность определения x_{qm} составляет около $(10-15)\%$. Формулой (5) удобно пользоваться в лабораторной практике, где значения r_a , x_l , x_q и x_d , а также характеристика холостого хода легко могут быть определены опытным путем.

в) Если известны только параметры исследуемого режима, характеристика холостого хода и непасыщенное значение поперечного синхронного реактansa, то для определения x_{q0} с точностью до $\pm (10 \div 20)\%$ можно воспользоваться формулой (6).

ВШНИКЭ

Поступило 1.V.1966

Յ. Չ. ՕՁԱՆՅԱՆ

ՊՈՂՊԱՏԻ ՀԱԳԵՑՄԱՆ ԳՈՐԾՆԱԿԱՆ ՀԱՇՎԱԽԻՄԱՆ ԽՐՈՇ ՄԵԹՈԴՆԵՐ
ԸՆԴՀԱՅՆԱԿԱՆ ՍՐԵՒՐՆԵ ՈՒՆԿՏԱՆՈՒ ԲՐՈՇՄԱՆ ԳԵՊԳՈՒՄ

Ո. Վ Վ Ր Ո Վ Ո Վ

Հողվածում զիտված են բացահայտ բեկոներ ունեցող սինխրոն մեքենաներում պողպատի հաղեցման պայմանների վրա ազդող գործոնները: Առաջարկվում է երեք բանաձև ընդլայնական սինխրոն սեպտանսի x_q որոշման ղեպրում պողպատի հաղեցման հաշվառման համար:

Երեք հետադուրված սինխրոն գեներատորների համար համեմատվում են x_q -ի հաշվարկային և փորձնական արժեքները: Ստացված երեք բանաձևերը առաջարկվում են x_q -ի որոշման համար՝ ի նկատի ունենալով պողպատի հաղեցումը բացահայտ բեկոներ ունեցող մինչև 100 կվտ կարողության սինխրոն մեքենաներում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Рахтер Р.* Электрические машины. т. II. Энергоиздат, 1936.
2. *Hamdi-Sepen D.* Saturation Effects in Synchronous Machines Trans. of A. I. E. E., 1954, 73, part III B, p. 1349.
3. *Steven R. E.* An Experimental Effective Value of the Quadrature-Axis Synchronous Reactance of a Synchronous Machine, The Proc. of the Inst. of El. Eng., part A n. 42, 1961.
4. *Ճավաջյան Յ. Բ., Դոմբրովսկի Վ. Վ., Կազովսկի Է. Յ.* Параметры электрических машин переменного тока. Издательство „Наука“, 1965.