

МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЯ СИНХРОННОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

Беренубо Э.Ф., Ал Ас Талал

Донецкий государственный технический университет

svf@fcita.dn.ua

An account of the method of equivalentizing groups of heavy-duty synchronous motors in the calculation of circuit power supply of electromagnetic transient phenomena are given below. The method is based on obtaining resultant conductance frequency response curves of a group of synchronous motors and the synthesis of equivalentizing their circuit representation.

Вопросы эквивалентирования двигательной нагрузки в сложных схемах электроснабжения являются актуальными в связи с возрастающими требованиями к повышению точности расчетов переходных режимов работы этих схем.

Методика эквивалентирования асинхронных двигателей изложена в работах [1,2], для синхронных же двигателей такая методика в настоящее время отсутствует и используются упрощенные подходы, основанные на учете только эквивалентных сверхпереходных индуктивного сопротивления и ЭДС [3].

В данной работе рассматривается методика эквивалентирования мощных синхронных турбодвигателей серии СТД, составляющих значительную долю в токах подпитки места короткого замыкания в системах электроснабжения ряда промышленных предприятий. Ставится задача определения параметров эквивалентной схемы замещения группы синхронных двигателей, подключенных к общим сборным шинам.

Будем считать известными паспортные данные каждого из N_d синхронных двигателей:

S_n - полная номинальная мощность, МВА; P_n - номинальная активная мощность, МВт; U_n - номинальное напряжение цепи статора, В; I_n - номинальный ток статора, А; η_n - номинальный коэффициент полезного действия; $\cos \varphi_n$ - номинальный коэффициент мощности; U_{fn} - номинальное напряжение обмотки возбуждения, В; I_{fn} - номинальный ток обмотки возбуждения, А; I_{f0} - ток холостого хода обмотки возбуждения, А, а также зависимости кратностей токов статора I_s и вращающего момента M от скольжения s .
 Параметры эквивалентных схем замещения двигателей с двумя демпферными контурами по осям d и q (рис. 1) получим по методике, изложенной в [4]. Согласно этой методике параметры схемы замещения (рис. 1) находим из условия минимизации суммы квадратов отклонений исходных и расчетных зависимостей от скольжения токов статора и вращающего момента.

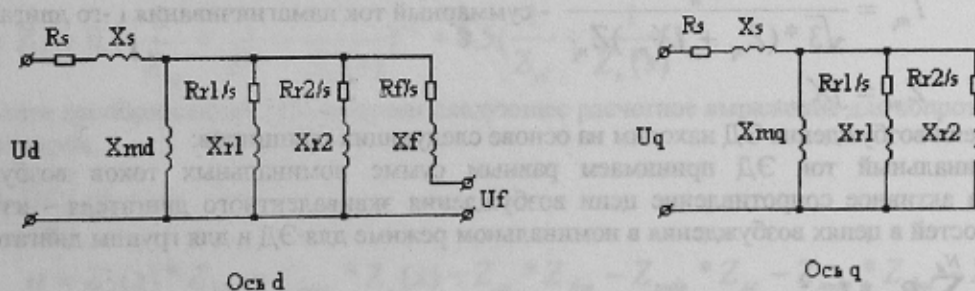


Рисунок 1 - Эквивалентная схема замещения синхронного двигателя

На рисунке 1 обозначены: R_s - активное сопротивление статора; X_s - индуктивное сопротивление рассеяния статора; $X_{mp} = X_{md} = X_{mq}$ - сопротивления взаимной индукции; R_{r1} и R_{r2} - активные сопротивления соответственно первого и второго контуров ротора; X_{r1} и X_{r2} - индуктивные сопротивления рассеяния соответственно первого и второго контуров; R_f и X_f - активное и индуктивное сопротивления рассеяния цепи возбуждения. Эти сопротивления находим в относительных номинальных единицах.

Отметим также, что для синхронных турбодвигателей параметры демпферных контуров принимаем одинаковыми по осям d и q.

В основу методики эквивалентирования группы двигателей положим следующие принципы.

Номинальные активную и реактивную мощности эквивалентного двигателя (ЭД) находим, как суммы номинальных соответствующих мощностей всех двигателей.

$$P_{ne} = \sum_{i=1}^{N_d} P_{n_i}; \quad Q_{ne} = \sum_{i=1}^{N_d} Q_{n_i}. \quad (1)$$

Номинальный ток ЭД найдем как

$$I_{ne} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{N_d} I_{n_i} * \cos \varphi_{n_i}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{N_d} I_{n_i} * \sin \varphi_{n_i}\right)^2}. \quad (2)$$

Коэффициент полезного действия ЭД найдем из условия равенства подведенных к статорам активных мощностей:

$$\eta_{ne} = P_{ne}^{-1} * \sum_{i=1}^{N_d} (1 + \eta_{n_i}) * P_{n_i} - 1. \quad (3)$$

Номинальный коэффициент мощности ЭД определяем как

$$\cos \varphi_{ne} = \frac{P_{ne}}{\sqrt{3} * U_{ne} * I_{ne} * \eta_{ne}}; \quad U_{ne} = U_{n_i}. \quad (4)$$

Активное и индуктивное сопротивления статора ЭД найдем соответственно из условия равенства в номинальном режиме потерь активных и реактивных мощностей в обмотках статоров:

$$Z_{se} = \frac{\sum_{i=1}^{N_d} (Z_{s_i} * Z_{n_i} * I_{n_i}^2)}{I_{ne}^2 * Z_{ne}}, \quad (5)$$

где: $Z_{s_i} = R_{s_i} + jX_{s_i}$ - сопротивление цепи статора i -го двигателя;

$$Z_{ne} = \frac{U_n}{\sqrt{3} * I_{ne}}; \quad Z_{n_i} = \frac{U_n}{\sqrt{3} * I_{n_i}} - \text{номинальные сопротивления ЭД и } i\text{-го двигателей};$$

Сопротивление цепи намагничивания ЭД можно найти из условия равенства реактивных мощностей, создающих главный магнитный поток в режиме холостого хода:

$$X_{me} = X_{mde} = X_{mqe} = \frac{\sum_{i=1}^{N_d} I_{m_i}^2 * X_{m_i} * Z_{n_i}}{I_{me}^2 * Z_{ne}}; \quad I_{me} = \sum_{i=1}^{N_d} I_{m_i}, \quad (6)$$

где: $I_{m_i} = \frac{U_n}{\sqrt{3} * (Z_{s_i} + jX_{m_i}) Z_{n_i}}$ - суммарный ток намагничивания i -го двигателя;
 $Z_m = jX_m$.

Параметры цепи возбуждения ЭД находим на основе следующих принципов:

- номинальный ток ЭД принимаем равным сумме номинальных токов возбуждения отдельных двигателей, а активное сопротивление цепи возбуждения эквивалентного двигателя - из условия равенства потерь мощностей в цепях возбуждения в номинальном режиме для ЭД и для группы двигателей:

$$R_{fe} = \frac{\sum_{i=1}^{N_d} R_{f_i} * I_{fn_i}^2}{I_{fne}^2}; \quad I_{fne} = \sum_{i=1}^{N_d} I_{fn_i}; \quad (7)$$

- индуктивность рассеяния находим из условия, что реактивная мощность в индуктивном сопротивлении рассеяния обмотки возбуждения ЭД равна сумме мощностей рассеяния всех двигателей, если при заторможенном роторе в обмотку возбуждения каждого двигателя подать переменный ток, равный по величине номинальному току возбуждения:

$$X_{fe} = \frac{\sum_{i=1}^{N_d} X_{f_i} * I_{fn_i}^2 * Z_{n_i}}{I_{fne}^2}; \quad (8)$$

- ток возбуждения холостого хода ЭД находим из условия, что отношение номинального тока ЭД к его току холостого хода будет такое же, как среднее значение для эквивалентируемых двигателей с учетом их коэффициента долевого участия, равного отношению мощностей i -го двигателя и эквивалентного:

$$I_{fixe} = \frac{I_{fne}}{\frac{1}{N_d} * \sum_{i=1}^{N_d} \left(\frac{I_{fni}}{I_{fci}} \right) * \frac{P_{ni}}{P_{ne}}} \quad (9)$$

Теперь представляется возможность определить значения базисного сопротивления цепи возбуждения для ЭД и найти параметры его обмотки возбуждения в относительных единицах:

$$Z_{bf} = \frac{\sum_{i=1}^{N_d} S_{ni}}{(I_{fixe} * X_{mde})^2}, \quad Z_{fe} = \frac{R_{fe} + jX_{fe}}{Z_{bf}} = R_{fe}^* + jX_{fe}^* \quad (10)$$

Для ЭД зависимости пускового тока $I_e(s)$ и $M_e(s)$ вращающего момента от скольжения находим путем суммирования токов и моментов двигателей, принимая равными их скольжения в каждой точке эквивалентирования (в диапазоне от 0 до 1):

$$M_e(s) = \frac{\sum_{i=1}^{N_d} M_i(s) * P_{ni}}{P_{ne}}; \quad (11)$$

$$I_e(s) = \frac{\sum_{i=1}^{N_d} I_{si}(s) * I_{ni}}{I_{ne}}, \quad (12)$$

где P_{ne} и I_{ne} – суммарные значения соответственно номинальных активных мощностей и токов статора группы двигателей, т.е. номинальные значения ЭД.

Из полученных по (11,12) результирующих зависимостей кратностей пускового тока и вращающего момента группы двигателей находим зависимости входных сопротивлений и проводимостей ЭД от скольжения s :

$$Z_v(s) = R_{se} + M_e(s) * I_e(s)^{-2} + j\sqrt{I_e(s)^{-2} - (R_{se} + M_e(s) * I_e(s)^{-2})^2}; \quad (13)$$

$$Y_v(s) = \frac{1}{Z_v(s)}. \quad (14)$$

Для перехода от входных параметров к роторным воспользуемся аналитическим представлением формулы входного сопротивления синхронного двигателя [4]:

$$Z_v(s) = Z_s + 0,5\left(\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z_f} + \frac{1}{Z_k(s)}\right)^{-1} + 0,5\left(\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z_k(s)}\right)^{-1}. \quad (15)$$

В результате преобразования (15) получим следующее расчетное выражение для сопротивления демпферных контуров:

$$Z_k(s) = \frac{0,25}{a}(b - c), \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{где} \quad a &= Z_v(s) * Z_{fne} + Z_{mde} * Z_v(s) - Z_{se} * Z_{fne} - Z_{mde} * Z_{se} - Z_{mde} * Z_{fne} - Z_{mde}^2, \\ b &= 2Z_v(s) * Z_{mde} * Z_{fne} + 2Z_{se} * Z_{mde} * Z_{fne} - Z_v(s) * Z_{mde}^2 + Z_{fne} * Z_{mde}^2 + Z_{se} * Z_{mde}^2, \\ c &= -Z_{mde}^2 \sqrt{Z_{se}^2 + Z_{fne}^2 + Z_v(s)^2 - 2Z_v(s) * Z_{se}}. \end{aligned}$$

Воспользовавшись (16), определяем зависимости сопротивлений и проводимостей цепи ротора от скольжения. По полученным зависимостям выполняем синтез двухконтурной эквивалентной схемы замещения цепи ротора ЭД [4]. Параметры схемы замещения ЭД могут быть использованы для расчета и анализа переходных и установившихся режимов группы синхронных двигателей.

В качестве примера в таблице приведены параметры группы эквивалентируемых синхронных двигателей и соответствующего им ЭД. К секции 6кВ были подключены три двигателя типа СТД. По изложенной методике были найдены параметры ЭД, значения которых приведены в таблице. Получена удовлетворительная точность аппроксимации частотных характеристик цепи ротора с погрешностью, не превышающей 8% во всем диапазоне скольжений.

Таблица

Тип двигателя	P_n , кВт	Z_n , Ом	Параметры статора и цепи взаимоиנדукции, о.е.			Параметры цепи возбуждения		
			R_s	X_s	X_m	U_{fn} , В	I_{fn} , А	I_{fex} , А
СТД-1000	1000	31,04	0,0105	0,1080	1,820	38,1	285,5	122,7
СТД-5000	5000	6,158	0,0062	0,1120	1,852	117,8	293,8	122,7
СТД-10000	10000	3,154	0,0110	0,0960	1,940	191,0	272,3	115,6
ЭД секции	16000	1,954	0,0094	0,1018	1,903	74,6	851,3	361,0

Продолжение таблицы

Тип двигателя	Параметры ротора и цепи возбуждения							
	R_{r1} , о.е.	X_{r1} , о.е.	R_{r2} , о.е.	X_{r2} , о.е.	R_f^* , о.е.	X_f^* , о.е.	R_f , Ом	X_f , Ом
СТД-1000	0,064	0,0100	0,070	0,652	0,0047	0,1220	0,0866	3,7869
СТД-5000	0,041	0,0120	0,046	0,634	0,0030	0,1480	0,2700	0,9114
СТД-10000	0,038	0,0086	0,052	0,223	0,0026	0,1400	0,4950	0,4401
ЭД секции	0,057	0,0036	0,055	0,104	0,0035	0,1483	0,0925	0,5792

ВЫВОД

Разработан метод эквивалентирования группы синхронных турбодвигателей, основанный на объединении их пусковых характеристик и расчете параметров цепи статора, намагничивания и возбуждения на основе энергетического эквивалентирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сивокобыленко В.Ф., Павлюков В.А. Метод эквивалентирования и расчета короткого замыкания в системе асинхронных машин. Электричество, № 1, 1979. с.45-50.
2. Жуков В.В. Короткие замыкания в узлах комплексной нагрузки электрических систем. / Под ред. А.Ф.Дьякова. -М.: Издательство МЭИ, 1994.- 224 с.
3. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. -М.: Энергия, 1970.- 520 с.
4. Сивокобыленко В.Ф., Костенко В.И. Математическое моделирование электродвигателей собственных нужд электрических станций. Учебное пособие. - Донецк: ДПИ, 1979.- 110 с.