

## О МЕТОДАХ РАСЧЕТА ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННЫХ ЯВНОПОЛЮСНЫХ МАШИН

Е. В. Кононенко, Т. В. Чешева

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Основной задачей исследования асинхронного режима синхронной явнополюсной машины является анализ законов изменения токов, намагничивающих сил, магнитных полей и моментов. При расчете асинхронного режима обычно ограничиваются определением лишь пусковых характеристик, под которыми понимаются зависимости среднего момента вращения и тока статора от скольжения. Поскольку наиболее распространенным и надежным средством изучения пусковых процессов синхронных и асинхронных двигателей является рассмотрение характеристик установившегося режима, в данной статье будут представлены формулы расчета только статических пусковых характеристик асинхронного режима. Это значит, что при всех расчетах скорость вращения ротора в любой момент времени предполагается постоянной.

Методы, используемые при исследовании и расчетах пусковых характеристик синхронных двигателей, разделяются на два основных — точный и приближенный. При этом точный расчет считается довольно сложным. Это обстоятельство послужило толчком к появлению множества упрощенных методов. Однако существующее в настоящее время многообразие методов вовсе не дает простого в расчете и точного по результатам метода, а, наоборот, приводит к затруднениям при выборе метода для практических расчетов и для исследования асинхронного режима новых типов синхронных машин [1—15].

В результате проведенного критического анализа существующих методов исследования и расчета характеристик асинхронного режима синхронных явнополюсных двигателей обнаружена необходимость строгой классификации, подразделяющей эти методы на точные и приближенные, с рекомендациями в отношении их использования. Эту классификацию вместе с расчетными формулами можно представить следующим образом.

### Точный метод

Основным условием точного расчета пусковых характеристик явнополюсных синхронных машин является определение выражений для всех токов и моментов из полной системы уравнений Парка—Горева. Для установившегося асинхронного режима работы эти уравнения в комплексном виде могут быть представлены так (при замкнутой обмотке возбуждения):

$$\bar{U}_d = \bar{I}_d [r + jsX_d(js)] - \bar{I}_q X_q(js) (1 - s), \quad (1)$$

$$\bar{U}_q = \bar{I}_d X_d(js) (1 - s) + \bar{I}_q [r + jsX_q(js)],$$

где

$$X_d(js) = x_d \frac{(1 + jsT'_d)(1 + jsT''_d)}{(1 + jsT'_{do})(1 + jsT''_{do})} \quad (2)$$

$$X_q(js) = \frac{1 + jsT''_q}{1 + jsT''_{qo}} \cdot x_q.$$

Если к обмотке статора подводится симметричная система напряжений, то составляющие напряжения  $U_d$  и  $U_q$  при постоянной скорости вращения ротора определяются:

$$U_d = U \cos(st + \delta_0), \quad (3)$$

$$U_q = U \sin(st + \delta_0),$$

где  $\delta_0 = \alpha_0 - \gamma_0$  — угол, образованный результирующим вектором напряжения с осью ротора  $d$  в начальный момент времени. Предполагая, что действительные величины определяются как вещественные части комплексов, можно написать

$$\bar{U}_d = Ue^{j(st + \delta_0)}, \quad (4)$$

$$\bar{U}_q = jUe^{j(st + \delta_0)}. \quad (5)$$

Решая систему уравнений (1) относительно токов  $\bar{I}_d$  и  $\bar{I}_q$ , можно определить составляющие пространственного вектора тока статора

$$\bar{i}_s = \bar{i}_{s1} + \bar{i}_{s2}, \quad (6)$$

где  $\bar{i}_{s1} = 1/2(\bar{I}_d + j\bar{I}_q)$  — пространственный вектор тока прямой последовательности;

$\bar{i}_{s2} = 1/2(\bar{I}_d^* + j\bar{I}_q^*)$  — пространственный вектор тока обратной последовательности.

(звездочкой обозначены сопряженные величины).

Действующее значение тока статора при любых значениях скольжения, кроме  $s=0$  и  $s=1,0$ , определяется по формуле

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2}, \quad (7)$$

где  $I_1$  и  $I_2$  — амплитуды токов  $\bar{i}_{s1}$  и  $\bar{i}_{s2}$ .

При  $s=1,0$  величина тока зависит от положения ротора в пространстве и изменяется в пределах от  $I_{\max} = I_1 + I_2$  до  $I_{\min} = I_1 - I_2$ . Зная выражения для составляющих токов, можно рассчитать средний момент как сумму моментов прямой и обратной последовательностей.

Для расчета пусковых характеристик явнополюсных синхронных двигателей по вышеупомянутому методу на цифровой вычислительной машине все формулы (1) ÷ (7) можно преобразовать к следующему виду:

$$a' = r + \left(\frac{1}{2} - s\right)(B + D),$$

$$b' = \left(\frac{1}{2} - s\right)(A + C),$$

$$c' = r^2 - rs(B + D) + (AC - BD)(1 - 2s),$$

$$d' = rs(A + C) + (BC + AD)(1 - 2s),$$

$$a'' = \left( \frac{1}{2} - s \right) (D - B),$$

$$b'' = \left( \frac{1}{2} - s \right) (C - A),$$

$$A = \frac{a_1}{b_1}, \quad B = \frac{a_2}{b_1}, \quad C = \frac{c_1}{b_2}, \quad D = \frac{c_2}{b_2},$$

$$a_1 = x_d - s^2 x_d [T'_d T''_d + T'_{do} T''_{do} - (T'_d + T''_d)(T'_{do} + T''_{do})] +$$

$$+ s^4 x_d T'_d T''_d T'_{do} T''_{do},$$

$$a_2 = s^3 x_d [T'_d T''_d (T'_{do} + T''_{do}) - T'_{do} T''_{do} (T'_d + T''_d)] -$$

$$- s x_d [(T'_{do} + T''_{do}) - (T'_d + T''_d)],$$

$$b_1 = 1 - 2s^2 T'_{do} T''_{do} + s^4 T'^2_{do} T''^2_{do} + s^2 (T'_{do} + T''_{do})^2,$$

$$b_2 = 1 + s^2 T''^2_{qo}$$

$$c_1 = x_q (1 + s^2 T''_q T''_{qo}),$$

$$c_2 = x_q s (T''_q - T_{qo}),$$

$$I_{1a} = \frac{a'c' - b'd'}{c'^2 + d'^2}, \quad I_{1p} = \frac{-b'c' - a'd'}{c'^2 + d'^2},$$

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2},$$

$$I_{2a} = \frac{a''c' + b''d'}{c'^2 + d'^2}, \quad I_{2p} = \frac{b''c' - a''d'}{c'^2 + d'^2},$$

$$I_2 = \sqrt{I_{2a}^2 + I_{2p}^2}, \quad I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2},$$

$$M_1 = UI_{1a} - rI_1^2, \quad M_2 = -\frac{r}{1-2s} I_2^2,$$

$$M_c = M_1 + M_2.$$

Амплитуда пульсирующего момента

$$M_{пл} = I_2 \sqrt{U^2 + \left[ \frac{2r(1-s)}{1-2s} I_1 \right]^2 - 4UI_{1a} \frac{r(1-s)}{1-2s}}.$$

Несмотря на достаточно высокую степень сложности данного метода, его необходимо рекомендовать в тех случаях, когда:

1) исследуется асинхронный режим синхронной машины новой конструкции, т. е. таких машин, для которых требуется детальное исследование работы машины в асинхронном режиме;

2) активное сопротивление обмотки статора достаточно велико и весьма существенна разница в установившихся значениях операторных сопротивлений по продольной  $d$  и по поперечной  $q$  осям машины.

### Приближенный метод

Применение упрощенных методов стало возможным благодаря тому, что точные методы расчета пусковых характеристик синхронных явнополюсных машин представляются достаточно сложными.

При расчете пусковых характеристик приближенным методом допускается возможность раздельного рассмотрения явлений по двум осям

ротора синхронной явнополюсной машины. Выражения для комплексов тока  $\bar{I}_d$  и  $\bar{I}_q$  в этом случае могут быть определены по эквивалентным схемам, аналогичным известным схемам замещения асинхронных двигателей, т. е.

$$\begin{aligned}\bar{I}_d &= \frac{1}{r + jX_d(js)} \bar{U}, \\ \bar{I}_q &= \frac{1}{r + jX_q(js)} \bar{U}.\end{aligned}\quad (8)$$

Расчет установившихся значений операторных сопротивлений  $X_d(js)$  и  $X_q(js)$  должен быть всегда достаточно точным, т. е. упрощения в расчете установившихся значений операторных сопротивлений и упрощения в методе расчета пусковых характеристик — не одно и то же.

Определение среднего момента вращения заключается в нахождении момента дважды: во-первых, в предположении, что машина имеет симметричный ротор и ее параметры по обеим осям равны параметрам по продольной оси; во-вторых, в предположении, что машина имеет симметричный ротор и ее параметры по обеим осям равны параметрам по поперечной оси. При этом средний момент является просто средним значением потерь в цепях ротора эквивалентных схем замещения по продольной и поперечной осям, если к каждой из них приложено напряжение, равное  $U$ .

Установившиеся значения операторных сопротивлений по двум осям ротора представляются в виде

$$\begin{aligned}jX_d(js) &= R_{ds} + jX_{ds}, \\ jX_q(js) &= R_{qs} + jX_{qs}.\end{aligned}$$

Действующее значение тока в обмотке статора будет равно

$$I = \sqrt{\frac{1}{2} I_d^2 + I_q^2} \quad (10)$$

Средний момент вращения определяется таким образом:

$$M_c = \frac{1}{2} (M_d + M_q) = \frac{1}{2} (I_d^2 R_{ds} + I_q^2 R_{qs}). \quad (11)$$

При этом после преобразования вещественные и мнимые части  $jX_d(js)$  и  $jX_q(js)$  можно записать следующим образом:

$$R_{ds} = \frac{a_2}{b_1}, \quad X_{ds} = \frac{a_1}{b_1}, \quad R_{qs} = \frac{c_2}{b_2}, \quad X_{qs} = \frac{c_1}{b_2}. \quad (12)$$

Из приведенных уравнений следует, что зависимости  $M_d=f(s)$  и  $M_q=f(s)$  ничем не отличаются от механических характеристик асинхронного двигателя с симметричным ротором. Следовательно, применяя при расчете эти расчетные формулы, нельзя проанализировать влияние несимметрии ротора на пусковые характеристики синхронной машины.

Итак, приближенные методы расчета, основанные на раздельном рассмотрении явлений по продольной и по поперечной осям ротора, можно использовать только при определенном соотношении параметров синхронной машины.

### Комбинированный метод

Комбинированный метод расчета статических пусковых характеристик синхронных явнополюсных машин предполагает приближенный расчет комплексов тока  $I_d$  и  $I_q$ , а моменты определяются по формулам

точного метода. Иными словами, токи определяются из эквивалентных схем замещения машины по двум осям при раздельном их рассмотрении, как в случае асинхронных двигателей с симметричным ротором. Средний момент определяется по формуле

$$M_c = M_1 + M_2.$$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Адкинс. Общая теория электрических машин, ГЭИ, 1960.
2. А. И. Ва ж н о в. Основы теории переходных процессов синхронной машины, ГЭИ, 1960.
3. Я. Б. Данилевич и Ю. А. Кулик. Теория и расчет демпферных обмоток синхронных машин. Изд. АН СССР, 1962.
4. Ч. Конкордия. Синхронные машины. Переходные и установившиеся процессы, пер. с англ., ГЭИ, 1959.
5. Р. А. Лютер. Моменты вращения синхронной машины в асинхронном режиме ВЭП, № 10, 1948.
6. В. М. Красников. Метод поэлементного расчета пусковых характеристик синхронного двигателя с пусковой клеткой, Сб. «Электромашиностроение и электрооборудование», вып. 1, 1965.
7. И. М. Толмач. Расчет пусковых характеристик синхронных двигателей по схеме замещения. «Электричество», 1956, № 1.
8. Б. Е. Кони к. Методика расчета пусковых характеристик явнополюсных синхронных двигателей. «Электричество», 1950, № 2.
9. М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. Электрические машины, «Энергия», М. — Л., 1965.
10. И. И. Талалов, А. П. Горшков. Влияние конструкции успокоительной обмотки на пусковые характеристики мощного синхронного компенсатора. Сб. «Вопросы теории и надежности электрических машин и аппаратов». «Энергия», М., 1967.
11. Е. В. Кононенко. Расчет пусковых характеристик синхронных реактивных двигателей Изв. ТПИ, т. 172, 1967.
12. И. Д. Урусов. Асинхронные характеристики синхронных машин ВЭП, № 8, 1957.
13. White J. C., Synchronous-Motors Starting Performance Calculation, «Power Apparatus and Systems», № 4, 1956.
14. Rankin A. W., The Direct and Quadratures Axis Equivalent circuits of the Synchronous Machine, Trans. AIEE, v. 64, 1945.
15. Linville T. M., Starting Performance of Salient-Pole Synchronous Motors, Trans. AIEE, v. 4, 1930.