

## СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ И ПАРАМЕТРЫ ШЕСТИФАЗНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН

В современных электроприводах находят применение шестифазные синхронные машины, якорные цепи которых образуются из двух трехфазных обмоток со смещенными в пространстве на 30 эл.град. магнитными осями. Для определения их характеристик в установившихся или переходных режимах наиболее эффективно используются уравнения в координатах d,q, жестко привязанных к ротору, при относительных единицах измерения параметров и переменных [1]. Вместе с тем, существенный интерес представляют соответствующие этим уравнениям схемы замещения, которые дают возможность:

- наглядно представить электромагнитные связи между отдельными контурами машины;
- упростить физическую трактовку исследуемых процессов и явлений;
- определять параметры, характеризующие максимальные значения токов, электромагнитных сил и моментов в аварийных ситуациях;
- методами схемных преобразований и диагностики оптимизировать решения задач в сложных электромеханических системах;
- проводить численные расчеты на ЭВМ с применением проблемно ориентированных программных комплексов (например, PSPICE).

Для синтеза схем замещения воспользуемся уравнениями [1], записанными в виде:

$$u_{d1} = \frac{d\psi_{d1}}{d\tau} - \omega\psi_{q1} + i_{d1}r; \quad \psi_{d1} = x'_{\sigma 1} \cdot i_{d1} + x_{\sigma 1,2} \cdot (i_{d1} + i_{d2}) + x_{ad} \cdot (i_{d1} + i_{d2} + i_{fd} + i_{ed}); \quad (1)$$

$$u_{d2} = \frac{d\psi_{d2}}{d\tau} - \omega\psi_{q2} + i_{d2}r; \quad \psi_{d2} = x'_{\sigma 2} \cdot i_{d2} + x_{\sigma 1,2} \cdot (i_{d1} + i_{d2}) + x_{ad} \cdot (i_{d1} + i_{d2} + i_{fd} + i_{ed}); \quad (2)$$

$$u_{fd} = \frac{d\psi_{fd}}{d\tau} + i_{fd}r_{fd}; \quad \psi_{fd} = x_{\sigma fd} \cdot i_{fd} + x_{ad} \cdot (i_{d1} + i_{d2} + i_{fd} + i_{ed}); \quad (3)$$

$$0 = \frac{d\psi_{ed}}{d\tau} + i_{ed}r_{ed}; \quad \psi_{ed} = x_{\sigma ed} \cdot i_{ed} + x_{ad} \cdot (i_{d1} + i_{d2} + i_{fd} + i_{ed}); \quad (4)$$

$$u_{q1} = \frac{d\psi_{q1}}{d\tau} + \omega\psi_{d1} + i_{q1}r; \quad \psi_{q1} = x'_{\sigma 1} \cdot i_{q1} + x_{\sigma 1,2} \cdot (i_{q1} + i_{q2}) + x_{aq} \cdot (i_{q1} + i_{q2} + i_{eq}); \quad (5)$$

$$u_{q2} = \frac{d\psi_{q2}}{d\tau} + \omega\psi_{d2} + i_{q2}r; \quad \psi_{q2} = x'_{\sigma 2} \cdot i_{q2} + x_{\sigma 1,2} \cdot (i_{q1} + i_{q2}) + x_{aq} \cdot (i_{q1} + i_{q2} + i_{eq}); \quad (6)$$

$$0 = \frac{d\psi_{eq}}{d\tau} + i_{eq}r_{eq}; \quad \psi_{eq} = x_{\sigma eq} \cdot i_{eq} + x_{aq} \cdot (i_{q1} + i_{q2} + i_{eq}); \quad (7)$$

$$u_{01} = x_{01} \frac{di_{01}}{d\tau} + i_{01}r; \quad u_{02} = x_{02} \frac{di_{02}}{d\tau} + i_{02}r. \quad (8)$$

При выводе выражений (1-8) приняты обычные для синхронных машин допущения, базисные единицы Ранкина и следующие обозначения:  $u, \psi, i$  - приложенные от внешней сети напряжения, потокосцепления и токи продольного (d) и поперечного (q) контуров якорной цепи, обмотки возбуждения (fd), демпферов (ed, eq);  $r, x$  - относительные значения активных и индуктивных сопротивлений, обусловленных полями рассеяния ( $\sigma$ ) и взаимной индукции (ad) обмоток якоря (d,q), возбуждения (fd), демпферных контуров (ed, eq). Дополнительные индексы (1,2) у параметров и переменных использованы для обозначения первой или второй трехфазных групп. Полная индуктивность рассеяния каждой группы равна сумме  $x'_{\sigma}$  и  $x_{\sigma 1,2}$ , где последний параметр соответствует потокам взаимного рассеяния групп, пропорциональным их токам ( $i_1, i_2$ ). Нулевые составляющие (8) фазных токов ( $i_{01}, i_{02}$ ) могут возникать в несимметричных режимах при выведенных или объединенных нейтральных, причем их роль такая же, как в обычной трехфазной машине.

Не трудно заметить, что в представленной форме уравнения (1-8) отвечают схемам замещения рис.1 (1-4). Аналогичную схему, отличающуюся отсутствием цепи возбуждения, величиной взаимной индуктивности контуров ( $x_{aq}$ ) и эдс вращения ( $\omega\psi_d$ ), можно построить согласно (5-7) для поперечной оси.

Принимая во внимание (1-2), потокосцепления статорных контуров  $\psi_{d1}, \psi_{d2}$  определяются напряжениями

между точками a1-0, a2-0 (рис.1):  $u_{a10} = \frac{d\psi_{d1}}{d\tau}; \quad u_{a20} = \frac{d\psi_{d2}}{d\tau}.$

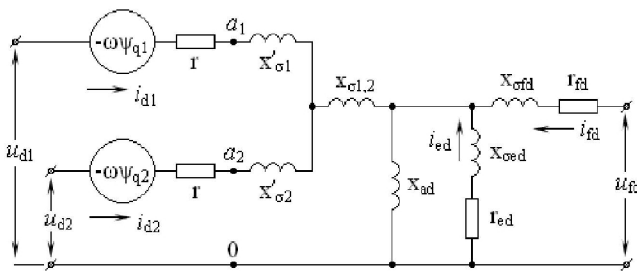


Рис.1 Схема замещения по продольной оси.

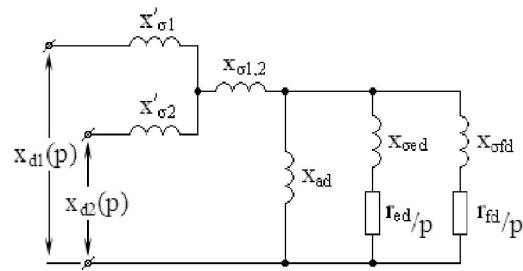


Рис.2 Операторное сопротивление машины по продольной оси.

Если теперь воспользоваться преобразованием по Карсону-Хевисайду, для приращений переменных в операторном виде при  $U_{fd} = \text{const}$  имеем:

$$\Delta\psi_d(p) = x_d(p) \cdot \Delta i_d(p).$$

Отсюда можно найти операторную индуктивность машины по продольной оси  $x_d(p)$ , равную входному сопротивлению схемы рис.2:

$$x_{d1}(p) = x'_{\sigma 1} + [x_{\sigma 12} + x''_{ad}(p)] \cdot [1 + \Delta i_{d2}(p) / \Delta i_{d1}(p)];$$

$$x_{d2}(p) = x'_{\sigma 2} + [x_{\sigma 12} + x''_{ad}(p)] \cdot [1 + \Delta i_{d1}(p) / \Delta i_{d2}(p)].$$

Соответственно, для поперечной оси:

$$x_{q1}(p) = x'_{\sigma 1} + [x_{\sigma 12} + x''_{aq}(p)] \cdot [1 + \Delta i_{q2}(p) / \Delta i_{q1}(p)];$$

$$x_{q2}(p) = x'_{\sigma 2} + [x_{\sigma 12} + x''_{aq}(p)] \cdot [1 + \Delta i_{q1}(p) / \Delta i_{q2}(p)],$$

где:  $x''_{ad}(p) = [x_{ad}^{-1} + (x_{\sigma ed} + r_{cd}/p)^{-1} + (x_{\sigma fd} + r_{fd}/p)^{-1}]^{-1}$ ;  $x''_{aq}(p) = [(x_{aq}^{-1} + (x_{\sigma eq} + r_{eq}/p)^{-1})^{-1}]^{-1}$ .

Важнейшими в теории синхронных машин являются сверхпереходные, переходные и синхронные индуктивные сопротивления. Первое из них соответствует операторной индуктивности при условии  $p \rightarrow \infty$ .

Следовательно:

$$x''_{d1} = x'_{\sigma 1} + [x_{\sigma 12} + x''_{ad}] \cdot [1 + i''_{d2} / i''_{d1}]; \quad x''_{d2} = x'_{\sigma 2} + [x_{\sigma 12} + x''_{ad}] \cdot [1 + i''_{d1} / i''_{d2}];$$

$$x''_{q1} = x'_{\sigma 1} + [x_{\sigma 12} + x''_{aq}] \cdot [1 + i''_{q2} / i''_{q1}]; \quad x''_{q2} = x'_{\sigma 2} + [x_{\sigma 12} + x''_{aq}] \cdot [1 + i''_{q1} / i''_{q2}],$$

где:  $x''_{ad} = [x_{ad}^{-1} + x_{\sigma ed}^{-1} + x_{\sigma fd}^{-1}]^{-1}$ ;  $x''_{aq}(p) = [(x_{aq}^{-1} + x_{\sigma eq}^{-1})^{-1}]^{-1}$ .

Переходное сопротивление определяется при отсутствии токов в демпферных контурах и оказывается равным:

$$x'_{d1} = x'_{\sigma 1} + [x_{\sigma 12} + x'_{ad}] \cdot [1 + i'_{d2} / i'_{d1}]; \quad x'_{d2} = x'_{\sigma 2} + [x_{\sigma 12} + x'_{ad}] \cdot [1 + i'_{d1} / i'_{d2}], \quad x'_{ad} = [x_{ad}^{-1} + x_{\sigma fd}^{-1}]^{-1}.$$

Наконец, для установившегося режима ( $p \rightarrow 0$ ):

$$x_{d1} = x'_{\sigma 1} + [x_{\sigma 12} + x_{ad}] \cdot [1 + i_{d2} / i_{d1}]; \quad x_{d2} = x'_{\sigma 2} + [x_{\sigma 12} + x_{ad}] \cdot [1 + i_{d1} / i_{d2}];$$

$$x_{q1} = x'_{\sigma 1} + [x_{\sigma 12} + x_{aq}] \cdot [1 + i_{q2} / i_{q1}]; \quad x_{q2} = x'_{\sigma 2} + [x_{\sigma 12} + x_{aq}] \cdot [1 + i_{q1} / i_{q2}].$$

Таким образом, в отличие от трехфазной синхронной машины в рассматриваемом случае параметры зависят от соотношения токов в отдельных группах. Например, для режима трехфазного короткого замыкания, когда током обтекается только одна группа:

$$x''_{d3} = x'_{\sigma 1} + x_{\sigma 12} + x''_{ad}; \quad x'_{d3} = x'_{\sigma 1} + x_{\sigma 12} + x'_{ad}; \quad x_{d3} = x'_{\sigma 1} + x_{\sigma 12} + x_{ad}.$$

В тоже время при замыкании всех шести фаз и условии  $x'_{\sigma 1} = x'_{\sigma 2}$  имеем:

$$x''_{d6} = x'_{\sigma 1} + 2(x_{\sigma 12} + x''_{ad}); \quad x'_{d6} = x'_{\sigma 1} + 2(x_{\sigma 12} + x'_{ad}); \quad x_{d6} = x'_{\sigma 1} + 2(x_{\sigma 12} + x_{ad}).$$

Последние соотношения объясняют факт снижения ударных токов и токов установившихся режимов при сравнении шестифазных и трехфазных коротких замыканий.

Литература: Сидельников Б.В., Кади-Оглы Е.Ф. Особенности режимов работы турбогенератора с шестифазной обмоткой. //Проблемы создания и эксплуатации новых типов электроэнергетического оборудования. СПб.: ОЭЭП РАН, 2004. С.33-46.