

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ЭНЕРГООБЛОКА С СИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ

М.Е. Гольдштейн, К.Ю. Филяев
г. Челябинск, ЮУрГУ

Разработана математическая модель энергоблока с синхронным генератором повышенной и/или варьруемой частоты и полупроводниковым преобразователем частоты, работающим на местную нагрузку параллельно с энергосистемой. В аналитической форме определены соотношения параметров рабочего режима комплекса.

В ближайшие годы в нашей стране планируется ввод ряда газотурбинных энергоблоков с улучшенными технико-экономическими показателями [1–3]. В их состав входит синхронный генератор повышенной частоты (СГПЧ) и звено связи с энергосистемой – полупроводниковый преобразователь частоты (ППЧ). Один из таких блоков изготовлен корпорацией «Энергомаш» и находится в стадии наладки [3]. Перспективным направлением применения блоков с СГПЧ является электроснабжение потребителей, находящихся в удаленных узлах энергосистемы (например, в районах добычи нефти и газа). Опыта эксплуатации энергосистем с такими блоками не известно. При решении различных технических и экономических задач, связанных с вводом подобных блоков, проводится расчет режимов энергосистемы, в том числе рабочих. Для этого необходима математическая модель комплекса, содержащего СГПЧ, ППЧ и энергосистему с местной нагрузкой. Необходима также и методика расчета режимов комплекса.

Для определения временных функций входных и выходных токов и напряжений ППЧ обычно рассматривают систему дифференциальных уравнений, аналитическое решение которой может быть достаточно трудоемким и громоздким [5]. Однако при расчетах рабочих режимов энергоблока, содержащего ППЧ, и в целом энергосистемы нет необходимости в детальном анализе электромагнитных процессов преобразователя, поскольку полезными составляющими его входных и выходных токов и напряжений являются их первые гармоники. Поэтому поставлена задача первоначально разработать и ввести в математическую модель комплекса модель ППЧ, позволяющую рассчитывать рабочие режимы рассматриваемого комплекса без анализа внутренних электромагнитных процессов в преобразователе, причем модель универсальную по типу ППЧ (учитывающую многообразие возможных вариантов его выполнения [6–10]).

Схема замещения комплекса в однолинейном изображении при общепринятых допущениях при

расчетах установившихся режимов энергосистем представлена на рисунке.

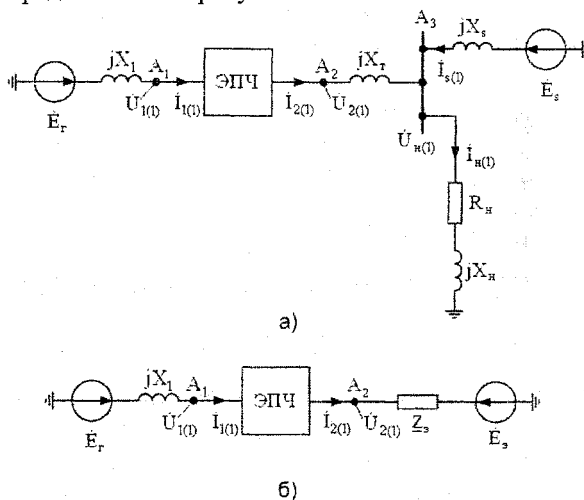


Схема замещения комплекса

Здесь генератор представлен комплексной ЭДС E_r и индуктивным сопротивлением, которое совместно с реактансом входного преобразовательного трансформатора (при наличии последнего) учтено сопротивлением X_1 . Сопротивлением X_2 представлен повышающий или выходной преобразовательный трансформатор. Нагрузка замещена активным R_n и индуктивным X_n сопротивлениями, система – комплексной ЭДС E_s и индуктивным сопротивлением X_s . Сопротивление X_1 определено при частоте генератора $\omega_r = 2\pi f_r$, а X_2 , X_n и X_s – при частоте системы ω_s . Все перечисленные параметры считаются заданными. Часть комплекса, работающая при частоте системы ω_s , в дальнейшем называется внешней частью комплекса, а при частоте генератора ω_r – генераторной частью. Параметры первой приведены к выходному напряжению ПЧ, а второй – к входному.

При формировании математической модели комплекса для расчета его рабочих режимов входящий в него ППЧ (независимо от его схемы и способа управления) представлен звеном эквивалентного преобразователя частоты (ЭПЧ) со следующими параметрами:

1) коэффициент преобразования по напряжению

$$K_U = U_{1(1)}/U_{2(1)}, \quad (1)$$

где $U_{1(1)}/U_{2(1)}$ – действующие значения первых гармоник соответственно входного и выходного напряжений ПЧ;

2) формируемые ПППЧ и связанные с параметрами генератора, нагрузки и системы фазовые сдвиги δ_1 и δ_2 соответственно между ЭДС генератора и напряжением $U_{1(1)}$, между напряжением $U_{2(1)}$ и ЭДС системы

$$\delta_1 = \varphi_{E_r} - \varphi_{U_{1(1)}}, \quad \delta_2 = \varphi_{U_{2(1)}} - \varphi_{E_s}, \quad (2)$$

где φ_{E_r} , φ_{E_s} , $\varphi_{U_{1(1)}}$, $\varphi_{U_{2(1)}}$ – соответственно фазы ЭДС генератора и системы, входного и выходного напряжений для фазы А схемы.

Эти параметры рассчитываются через заданные параметры комплекса по выражениям, вид которых зависит от типа ПППЧ. Данные выражения для вставок постоянного тока с выпрямителем и инвертором, выполненными по схеме трехуровневого преобразователя напряжения с широтно-импульсной модуляцией, с ведомым сетью инвертором и с автономным инвертором тока приведены в работах [8–10]. Требуемые для реализации режима комплекса параметры ЭПЧ достигаются выбором параметров элементной базы ПППЧ и формированием соответствующих законов управления.

Представим внешнюю часть комплекса эквивалентной ветвью с ЭДС $\dot{E}_3 = E_3 e^{j\varphi_{E_3}}$ и сопротивлением $\underline{Z}_3 = Z_3 e^{j\varphi_3}$ (рисунок, б). Тогда, учитывая принятую модель ЭПЧ, рабочий режим комплекса опишем следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \dot{U}_{2(1)} - \dot{I}_{2(1)} \underline{Z}_3 = \dot{E}_3; \\ \dot{U}_{1(1)} + \dot{I}_{1(1)} jX_1 = \dot{E}_r; \\ U_{1(1)}/U_{2(1)} = K_U; \\ U_{1(1)} I_{1(1)} \cos(\varphi_{E_r} - \delta_1 - \varphi_{I_{1(1)}}) = U_{2(1)} I_{2(1)} \cos(\delta_2 + \varphi_{E_s} - \varphi_{I_{2(1)}}); \\ U_{1(1)} E_r \sin \delta_1 = X_1 U_{2(1)} I_{2(1)} \cos(\delta_2 + \varphi_{E_s} - \varphi_{I_{2(1)}}). \end{cases} \quad (4)$$

В действительной форме эта система принимает вид

$$\begin{cases} U_{2(1)}^2 - 2U_{2(1)} I_{2(1)} Z_3 \cos(\delta_2 + \varphi_{E_s} - \varphi_{I_{2(1)}} - \varphi_3) + (I_{2(1)} Z_3)^2 = E_3^2; \\ \arctg \frac{U_{2(1)} \sin(\delta_2 + \varphi_{E_s}) - I_{2(1)} Z_3 \sin(\varphi_{I_{2(1)}} + \varphi_3)}{U_{2(1)} \cos(\delta_2 + \varphi_{E_s}) - I_{2(1)} Z_3 \cos(\varphi_{I_{2(1)}} + \varphi_3)} = \varphi_{E_3}; \\ U_{1(1)} + X_1 I_{1(1)} \sin(\varphi_{E_r} - \delta_1 - \varphi_{I_{1(1)}}) = E_r \cos \delta_1; \\ U_{1(1)}/U_{2(1)} = K_U; \\ U_{1(1)} I_{1(1)} \cos(\varphi_{E_r} - \delta_1 - \varphi_{I_{1(1)}}) = U_{2(1)} I_{2(1)} \cos(\delta_2 + \varphi_{E_s} - \varphi_{I_{2(1)}}); \\ \frac{U_{1(1)} E_r}{X_1} \sin \delta_1 = U_{2(1)} I_{2(1)} \cos(\delta_2 + \varphi_{E_s} - \varphi_{I_{2(1)}}). \end{cases} \quad (5)$$

Из решения этих уравнений следует, что

$$\varphi_{I_{2(1)}} = \delta_2 + \varphi_{E_s} - \arctg \left[\frac{\operatorname{tg} \varphi_3 - \frac{E_3}{K_U E_r} \frac{X_1}{Z_3 \cos \varphi_3} \frac{\sin(\delta_2 + \varphi_{E_s} - \varphi_{E_3})}{\sin \delta_1}} \right], \quad (6)$$

$$\begin{aligned} U_{1(1)} &= K_U^2 \frac{Z_3}{X_1} E_r \frac{\sin \delta_1}{\sin(\delta_2 + \varphi_{E_s} - \varphi_{E_3})} \frac{\sin(\varphi_{I_{2(1)}} - \varphi_{E_3} + \varphi_3)}{\cos(\delta_2 + \varphi_{E_s} - \varphi_{I_{2(1)}})} = \\ &= \frac{Z_3}{X_1 \cos \varphi_3} K_U^2 E_r \sin \delta_1 + [\cos(\delta_2 + \varphi_{E_s} - \varphi_{E_3}) - \operatorname{tg} \varphi_3 \sin(\delta_2 + \varphi_{E_s} - \varphi_{E_3})] K_U E_3; \end{aligned} \quad (7)$$

$$U_{2(1)} = U_{1(1)}/K_U = \frac{Z_3}{X_1 \cos \varphi_3} K_U E_r \sin \delta_1 + [\cos(\delta_2 + \varphi_{E_s} - \varphi_{E_3}) - \operatorname{tg} \varphi_3 \sin(\delta_2 + \varphi_{E_s} - \varphi_{E_3})] E_3; \quad (8)$$

Таким образом, с одной стороны, система уравнений (5) устанавливает связь между параметрами ЭПЧ и параметрами режима генераторной и внешней частей комплекса. С другой стороны, решение этой системы позволяет определить зависимости величин $U_{1(1)}$, $U_{2(1)}$, действующих значений $I_{1(1)}$, $I_{2(1)}$ и фаз $\varphi_{11(1)}$, $\varphi_{12(1)}$ входного и выходного токов ЭПЧ от заданных параметров комплекса и в последующем рассматривать электромагнитные процессы в ПППЧ.

Таким образом, сформирована математическая модель, позволяющая, во-первых, определять взаимосвязь параметров рабочих режимов комплекса без анализа электромагнитных процессов в ПППЧ, и, во-вторых, через параметры режима генератора и системы определять исходные параметры, необходимые для управления изменением режима ПППЧ в соответствии с изменением режима комплекса в целом.

Литература

1. Данилевич Я.Б., Сигаев В.Е. Электрические установки с синхронными генераторами нестандартной частоты// *Электричество*. – 2000. – № 5. – С. 26–31.
2. Атрощенко В.А., Григораши О.В. Непосредственный преобразователь частоты с улучшенными техническими характеристиками для систем автономного электроснабжения// *Электротехника*. – 1997. – № 11. – С. 56–57.
3. Приоритет отдела турбогенераторов// *Газета российских энергомашиностроителей «Энергомаш»*. – 2004. – № 8(108). – С. 5.
4. Чтобы серия была безупречной// *То же*. С. 6.
4. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учеб. пособие. – Изд. 3-е, испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004.
5. Быков Ю.М. Непосредственные преобра-

зователи частоты с автономным источником энергии. – М.: Энергия, 1977.

6. Гольдштейн М.Е., Прокудин А.В., Филяев К.Ю. Схема выдачи мощности комплекса, содержащего генератор с повышенной частотой напряжения// *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2003. – Вып. 3. – №11(27). – С. 9–11.

7. Гольдштейн М.Е., Филяев К.Ю. Функциональные и структурные особенности силовой схемы комплекса ГТУ – генератор с повышенной варьируемой скоростью вращения – преобразователь частоты со звеном постоянного тока// *Сборник трудов 3-й ВНТК с международным участием «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов»*. – Благовещенск: Изд-во Амурского гос. ун-та, 2003. – Т. 2. – С. 174–176.

8. Гольдштейн М.Е., Филяев К.Ю. Взаимосвязь параметров режима электротехнического комплекса «синхронный генератор – вставка постоянного тока – энергосистема»// *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2004. – Вып. 3. – №11(27). – С. 109–112.

9. Гольдштейн М.Е., Филяев К.Ю. Математическая модель энергоблока, содержащего вставку постоянного тока с зависимым инвертором// *Материалы одиннадцатой Всероссийской НТК «Энергетика: экология, надежность, безопасность»*. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2005. – С. 80–84.

10. Гольдштейн М.Е., Филяев К.Ю. Математическая модель энергоблока, содержащего преобразователь частоты с параллельным автономным инвертором тока// *Изв. Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. Юбилейный 15 том, посвященный 100-летию со дня рождения А.М. Бамдаса и Ю.Л. Мукосеева/ Под. ред. Ю.В. Гуляева*. – М. – Н. Новгород: НГТУ, 2005. – Т. 15. – С. 245 – 249.

Гольдштейн Михаил Ефимович – зав. кафедрой ЭССиС ЮУрГУ, к.т.н., профессор, выпускник кафедры ЭССиС ЧПИ (1961 г.). Присвоена степень к.т.н. и звание доцента в 1975 г, профессора – в 1999 г. На кафедре работает с 1969 г. Научные интересы связаны с развитием систем электроэнергетики с силовыми полупроводниковыми преобразователями.

Филяев Константин Юрьевич – старший преподаватель кафедры ЭССиС ЮУрГУ (выпускник 2002 г.). Научная работа связана с системами с силовыми полупроводниковыми преобразователями.