

УДК 681.51:681.3

РЕЛЕЙНО-ЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ БЕСЩЕТОЧНЫМИ
СИНХРОННЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

Ю.Н. Хижняков, А.А. Южаков

Пермский государственный технический университет

E-mail: luda@at.pstu.ac.ru

Рассмотрен релейно-логический метод управления параллельной работой бесщеточных синхронных генераторов в режиме параллельной работы с сетью в полярной системе координат. Разработаны варианты структурных схем и алгоритмы управления. Достоинством метода является применение «сильного» регулирования, которое обеспечивает равномерное распределение реактивной и активной мощности между бесщеточными синхронными генераторами с квазистатическими внешними характеристиками.

Ключевые слова:

Бесщеточный синхронный генератор, релейно-логический метод, блок динамического приоритета, выявитель, датчики модуля полного тока статора, датчики активного тока статора, блок пороговых элементов, полярная система координат, алгоритм управления.

Key words:

Brushless synchronous generator, relay-logical method, dynamical priority unit, detector, full stator current module sensors, active stator current sensors, threshold elements unit, polar coordinate system, scheduling algorithm.

Введение

В настоящее время разными фирмами выпускаются блочно-контейнерные газотурбинные электростанции (ГТЭС). Разработанные ГТЭС мощностью 2,4...63 МВт применяются для электроснабжения потребителей районов, где отсутствуют линии электропередач высокого напряжения, либо там, где их экономически целесообразно устанавливать дополнительно. ГТЭС содержит в себе несколько бесщеточных синхронных генераторов (БЩСГ) с воздушным охлаждением, которые приводятся во вращение газотурбинными установками на базе авиационных двигателей. БЩСГ является преобразователем механической энергии, вырабатываемой авиационным двигателем, в электрическую энергию. Мощность авиационного двигателя примерно равна мощности БЩСГ. Общими требованиями к ГТЭС являются параллельная работа нескольких БЩСГ на нагрузку в автономном режиме и с участием сети бесконечной мощности при выполнении всех требований по качеству вырабатываемой электроэнергии согласно ГОСТ 13109–97.

Традиционно управление параллельной работой синхронных генераторов малой и средней мощности выполняется по методу внутреннего статизма [1]. По этому методу статизм внешних характеристик генераторов должен быть не менее 6 %.

С целью повышения точности распределения реактивных и активных составляющих токов нагрузки между БЩСГ предлагается релейно-логический метод (РЛМ) [2].

РЛМ есть метод управления параллельной работой БЩСГ, где релейно сравниваются относительные токи статора параллельно работающих генераторов с последующей логической обработкой сигналов. Рассмотрим варианты реализации структурных схем и алгоритмов управления параллельной работой БЩСГ с сетью в полярной системе координат:

А. Особенностью управления параллельной работой БЩСГ с сетью бесконечной мощности в полярной системе координат (ПСК) является сравнение векторов полного тока статоров БЩСГ через сравнение интервалов времени Δt , пропорциональных фазовым сдвигам между токами и напряжением одноименной фазы статоров БЩСГ, и релейно-логическое сравнение модулей полного тока.

Известно, что напряжение фазы «а» на шинах генераторов изменяется по закону $u_a = U_m \sin \omega t$, а ток, например, в фазе «а» $i_a = I_m \sin(\omega t - \varphi)$. В момент прохождения тока i_a через нуль, следует

$$i_a(\Delta t) = I_m \sin(\omega \Delta t - \varphi) = 0; \\ (\omega \Delta t - \varphi) = 0 \text{ или } \varphi = \omega \Delta t, \quad (1)$$

т. е. фазовый сдвиг φ между напряжением и током пропорционален временному интервалу Δt между моментами времени перехода кривых напряжения u_a и тока i_a через нуль; ω — круговая частота. Очевидно также, что активная и реактивная мощности фазы генератора определяются по формулам (2) [3]:

$$P = UI \cos \varphi; \\ Q = UI \sin \varphi. \quad (2)$$

Тогда угол сдвига между вектором напряжения и вектором тока одноименной фазы первого генератора определяется по формуле (3)

$$\varphi_1 = \arccos \frac{I_{a1}}{I_1} = \arcsin \frac{I_{p1}}{I_1}, \quad (3)$$

где I_{a1} , I_{p1} — активная и реактивная составляющие тока первого генератора. I_1 — модуль полного тока первого генератора.

Подставив (3) в (1), получим временной интервал Δt_1

$$\Delta t_1 = \frac{1}{\omega_1} \arccos \frac{I_{a1}}{I_1} = \frac{1}{\omega_1} \arcsin \frac{I_{p1}}{I_1}. \quad (4)$$

Согласно (4) следует, что чем больше активная мощность генератора, тем меньше Δt и наоборот, а также, чем больше реактивная мощность генератора, тем больше Δt и наоборот.

Если ввести в рассмотрение параллельно работающий второй генератор, то для него, аналогично, можно записать:

$$\Delta t_2 = \frac{1}{\omega_2} \arccos \frac{I_{a2}}{I_2} = \frac{1}{\omega_2} \arcsin \frac{I_{p2}}{I_2}. \quad (5)$$

Сравнивая интервалы времени Δt_1 и Δt_2 при равных модулях полных токах I_1 и I_2 , можно выявить генератор с большим или меньшим значением реактивной/активной мощности. В выражениях (4), (5) обратная функция косинуса берется от относительных активных составляющих токов БЩСГ, а обратная функция синуса — от относительных реактивных составляющих токов БЩСГ, базисными значениями которых являются модули полных токов одноименной фазы. В выражениях (4), (5) принимается

$$\omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega_c,$$

где ω_1 , ω_2 , ω_c — круговая частота, соответственно, первого и второго генераторов и сети бесконечной мощности.

Таким образом, в качестве входных параметров для управления параллельной работы БЩСГ в ПСК с релейной настройкой обосновано применение временного интервала Δt и модуля полного тока БЩСГ.

При параллельной работе БЩСГ на нагрузку, имеющей активно-индуктивный характер, очевидно, что БЩСГ, имеющий меньший временной интервал, имеет минимальный реактивный ток и максимальный активный ток, а БЩСГ, имеющий больший временной интервал, имеет максимальный реактивный ток и минимальный активный ток.

Распределение реактивной/активной составляющих полной мощности между генераторами осуществляется ранжированием генераторов по временному интервалу (фазовому сдвигу между векторами тока и напряжения одноименной фазы) с помощью блока динамического приоритета (БДП) [4], реализующего обработку входных сигналов с относительным приоритетом типа «первый пришел — первый обслужен».

Логическое описание БДП:

- у БЩСГ, занимающего первое место в очереди, ток статора первым проходит через нуль после начала положительного полупериода напряжения на шинах.
- у БЩСГ, занимающего последнее место в очереди, ток статора последним проходит через нуль после начала положительного полупериода напряжения на шинах.

Ранжирование параллельно работающих БЩСГ с релейно-логическим управлением с помо-

щью БДП в каждый положительный полупериод фазного напряжения на шинах с частотой 50 Гц требует блок фиксации первого места в очереди, т. к. частота регулирования много меньше частоты питающего напряжения. Выход блока фиксации первого места в очереди является выходом выявителя V_1 , который включает в себя нуль-орган по напряжению (НО_н), нуль-органы тока (НО) по числу БЩСГ, RS-триггеры по числу БЩСГ и БДП.

Для определения БЩСГ с максимальным модулем полного тока нагрузкой через релейное сравнение введен выявитель V_2 с настройкой на максимум, построенный на основании полного графа. Выявитель V_2 включает в себя блок пороговых элементов (БПЭ), дешифратор (ДШ) и датчики модулей полного тока (ДМПТ) по числу БЩСГ.

Выявитель V_2 имеет математическое описание в виде системы логических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{V}_1 &= P_{1-2} \wedge P_{1-3} \wedge \dots \wedge P_{1-i} \wedge \dots \wedge P_{1-j} \wedge \dots \wedge P_{1-n}; \\ \tilde{V}_2 &= \bar{P}_{2-1} \wedge \bar{P}_{2-3} \wedge \dots \wedge P_{2-i} \wedge \dots \wedge P_{2-j} \wedge \dots \wedge P_{2-n}; \\ &\dots \dots \dots \\ \tilde{V}_i &= \bar{P}_{i-1} \wedge \bar{P}_{i-2} \wedge \dots \wedge P_{i(i-1)} \wedge \dots \wedge P_{i-j} \wedge \dots \wedge P_{i-n}; \\ &\dots \dots \dots \\ \tilde{V}_j &= \bar{P}_{j-1} \wedge \bar{P}_{j-2} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{j-i} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{j-(j-1)} \wedge \dots \wedge P_{j-n}; \\ &\dots \dots \dots \\ \tilde{V}_n &= \bar{P}_{n-1} \wedge \bar{P}_{n-2} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{n-i} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{n-j} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{n(n-1)} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $\tilde{V}_1, \tilde{V}_2, \dots, \tilde{V}_n$ — выходы выявителя V_2 с настройкой на максимум; n — число генераторов ГТЭС; $P_{1-2}, \dots, P_{1-j}, \dots, P_{1-(n-1)}$ — прямые пороговые функции сравнения модулей полного тока; $\bar{P}_{1-2}, \dots, \bar{P}_{1-j}, \dots, \bar{P}_{1-(n-1)}$ — инверсные пороговые функции сравнения модулей полного тока. Число Z релейных элементов БПЭ определяется по формуле

$$Z = 0,5n(n-1). \quad (7)$$

Выходы выявителей V_1 и V_2 управляют распределением активной и реактивной мощностями БЩСГ в ГТЭС согласно следующих алгоритмов.

Алгоритм распределения активной мощности между БЩСГ следующий:

- уменьшить частоту вращения привода БЩСГ с максимальным активным током статора БЩСГ при частоте на шинах $\omega > \omega_c$.
- увеличить одновременно частоту вращения приводов БЩСГ при частоте на шинах $\omega \leq \omega_c$.

Алгоритм распределения реактивной мощности между БЩСГ:

- увеличить ток возбуждения i -БЩСГ с минимальным реактивным током статора при напряжении на шинах $U \leq U_c$.
- уменьшить одновременно токи возбуждения БЩСГ при напряжении на шинах $U > U_c$.

На рис. 1 приведена структурная схема управления параллельной работой БЩСГ по РЛМ в ПСК,

где собственные регуляторы напряжения генераторов не указаны.

Возможен и обратный вариант подключения выходов блока логики к управляющим органам БЩСГ и их приводов.

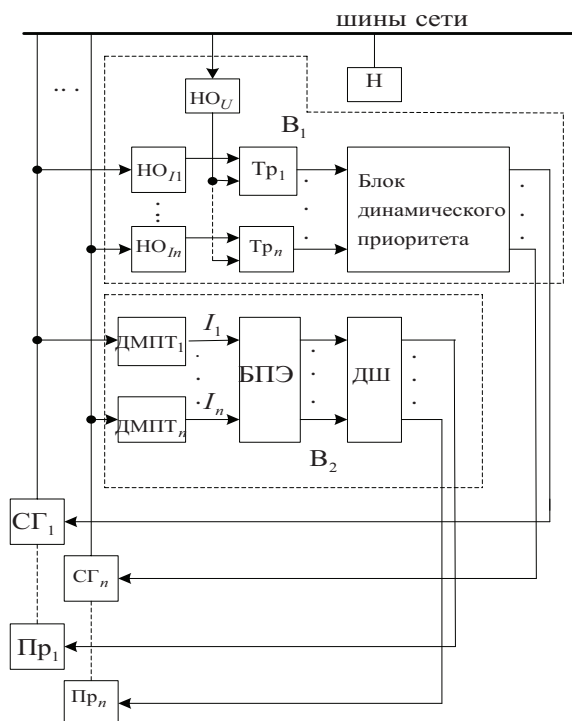


Рис. 1. Структурная схема управления параллельной работой БЩСГ по РЛМ в ПСК: HO_u – нуль-орган по напряжению; $(HO_1 - HO_n)$ – нуль-органы тока; $(TR_1 - TR_n)$ – RS-триггеры; $(ДМПТ_1 - ДМПТ_n)$ – датчики модулей полного тока; БПЭ – блок пороговых элементов; ДШ – дешифратор; $СГ_i$ – i -БЩСГ; $ПР_i$ – i -привод

Б. Особенностью управления параллельной работой БЩСГ в ПСК по данному варианту в отличие от варианта А является сравнение относительных токов статоров БЩСГ через сравнение временных интервалов Δt , пропорциональных фазовым сдвигам между векторами тока и напряжения одноименной фазы статоров БЩСГ в ПСК, и релейно-логического сравнения активных составляющих токов БЩСГ. Очевидно также, что активная и реактивная составляющие мощности одноименной фазы первого генератора равны, соответственно (2):

$$\varphi_1 = \arctg \frac{I_{p1}}{I_{a1}}. \quad (8)$$

Из выражения активной P_1 и реактивной Q_1 мощностей (1) следует, что изменение их зависит от изменения угла сдвига фаз φ между векторами напряжения и тока одноименной фазы первого генератора.

Подставив (8) в (1), получим:

$$\Delta t_1 = \frac{1}{\omega_1} \arctg \frac{I_{p1}}{I_{a1}}. \quad (9)$$

Согласно (9) следует, чем больше реактивная мощность генератора, тем больше Δt и наоборот. Если ввести в рассмотрение параллельно работающий второй генератор, то для него, аналогично, можно записать:

$$\Delta t_2 = \frac{1}{\omega_2} \operatorname{arctg} \frac{I_{p2}}{I_{a2}}.$$

Сравнивая интервалы времени Δt_1 и Δt_2 при равных активных составляющих токов I_{a1} и I_{a2} , можно выявить генератор с большим или меньшим значением реактивной мощности. В выражениях (8), (9) обратная функция тангенс берется от относительной реактивной составляющей токов БЩСГ, где базисными значениями являются активные составляющие токов одноименной фазы. В выражениях (8), (9) принимается $\omega_1 = \omega_2 = \dots, \omega = \omega_{\text{ш}} = \omega_{\text{эл}}$.

Таким образом, в качестве входных параметров для управления параллельной работы БЩСГ в ПСК с релейной настройкой обосновано применение временного интервала Δt и активной составляющей тока БЩСГ. Распределение реактивной/активной составляющих мощности между БЩСГ осуществляется ранжированием БЩСГ по временному интервалу (фазовому сдвигу между векторами тока и напряжения одноименной фазы) с помощью БДП, реализующего обработку входных сигналов с относительным приоритетом типа «первый пришел – первый обслужен», функционирующему аналогично вышеизложенному.

Для определения БЩСГ с максимальным активным током нагрузки через релейное сравнение введен выявитель V_3 с настройкой на максимум, построенный на основании полного графа. Выявитель V_3 состоит из датчиков активного тока (ДАТ) по числу БЩСГ, блока пороговых элементов (БПЭ) и дешифратора (ДШ). Выявитель V_3 имеет математическое описание в виде системы логических уравнений.

$$\begin{aligned} \tilde{V}_1 &= P_{1-2} \wedge P_{1-3} \wedge \dots \wedge P_{1-i} \wedge \dots \wedge P_{1-j} \wedge \dots \wedge P_{1-n}; \\ \tilde{V}_2 &= \overline{P}_{2-1} \wedge \overline{P}_{2-3} \wedge \dots \wedge P_{2-i} \wedge \dots \wedge P_{2-j} \wedge \dots \wedge P_{2-n}; \\ &\dots\dots\dots \\ \tilde{V}_i &= \overline{P}_{i-1} \wedge \overline{P}_{i-2} \wedge \dots \wedge P_{i(i-1)} \wedge \dots \wedge P_{i-j} \wedge \dots \wedge P_{i-n}; \\ &\dots\dots\dots \\ \tilde{V}_j &= \overline{P}_{j-1} \wedge \overline{P}_{j-2} \wedge \dots \wedge \overline{P}_{j-i} \wedge \dots \wedge \overline{P}_{j-(j-1)} \wedge \dots \wedge P_{j-n}; \\ &\dots\dots\dots \\ \tilde{V}_n &= \overline{P}_{n-1} \wedge \overline{P}_{n-2} \wedge \dots \wedge \overline{P}_{n-i} \wedge \dots \wedge \overline{P}_{n-j} \wedge \dots \wedge \overline{P}_{n(n-1)} \end{aligned}$$

где $\tilde{V}_1, \tilde{V}_2, \dots, \tilde{V}_n$ – выходы выявителя B_3 с настройкой на максимум; n – число генераторов ГТЭС; $P_{1-2}, \dots, P_{i-j}, \dots, P_{n-(n-1)}$ – прямые пороговые функции сравнения активных токов; $\bar{P}_{1-2}, \dots, \bar{P}_{i-j}, \dots, \bar{P}_{n-(n-1)}$ – инверсные пороговые функции сравнения активных токов. Число Z релейных элементов БПЭ определяется по формуле (7).

На рис. 2 приведена структурная схема управления параллельной работой БЩСГ по РЛМ в ПСК по варианту Б, где собственные регуляторы напряжения генераторов не указаны. Моделирование подтвердило возможность управления БЩСГ в ГТЭС по РЛМ.

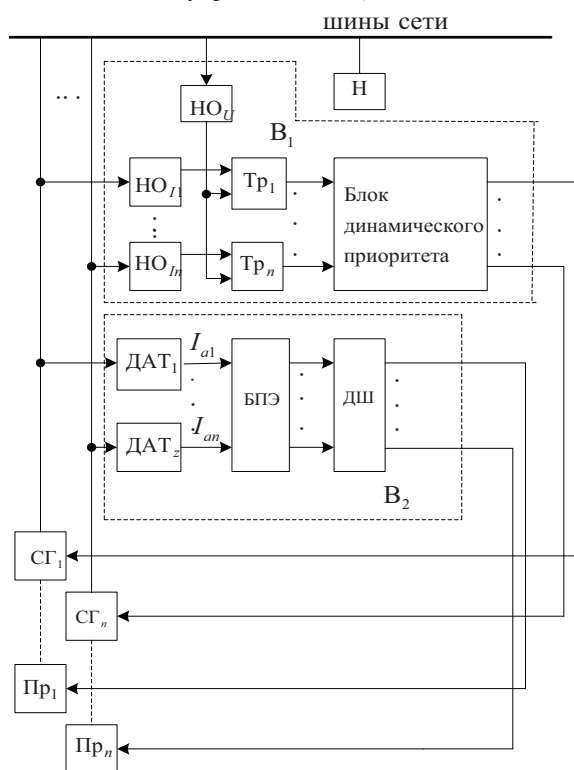


Рис. 2. Структурная схема управления параллельной работой БЩСГ по РЛМ в ПСК: HO_U – нуль-орган по напряжению; ($HO_1 \dots HO_n$) – нуль-органы тока; БПЭ – блок пороговых элементов; ДШ – дешифратор; $СГ_i$ – i-БЩСГ; $Пр_i$ – i-привод; ($Tr_1 \dots Tr_n$) – RS-триггеры; ($ДАТ_1 \dots ДАТ_n$) – датчики активного тока

Для проверки работоспособности системы управления параллельной работы БЩСГ с сетью бесконечной мощности по варианту А разработана цифровая модель «РЛМ» [2]. Два БЩСГ представлены в виде дифференциальных уравнений Парка-Горева в модификации Л.П. Веретенникова, т. е. записаны через внутреннюю ЭДС в аномальной системе относительных единиц. На шины бесконечной мощности включена пассивная и асинхронная нагрузки. Результаты моделирования подтверждают распределение нагрузки между генераторами с заданной точностью.

Выводы

1. Показано, что релейно-логический метод распределения активной и реактивной мощности при параллельной работой синхронных генераторов, работающих на шины бесконечной мощности, обеспечивает мгновенную реакцию при включении асинхронной нагрузки, что повышает статическую и динамическую устойчивость в работе, исключает уравнильные провода для выравнивания напряжения возбудителей генераторов и является альтернативным решением по отношению к методу внутреннего статизма, широко применяемого на современных электростанциях.
2. Разработаны варианты структурных схем управления параллельной работой генераторов с сетью бесконечной мощности по релейно-логическому методу в полярной системе координат.
3. Созданы алгоритмы управления параллельной работой генераторов с сетью бесконечной мощности по релейно-логическому методу в полярной системе координат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москалев А.Г. Автоматическое регулирование режима энергетической системы по частоте и активной мощности. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 240 с.
2. Хижняков Ю.Н. Комбинированный метод управления параллельной работой генераторов переменного тока. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 1999. – 114 с.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Изд. 6-е, перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1973. – 752 с.
4. Устройство динамического приоритета: а. с. 1670687 СССР; опубл. в Б.И. 1991. – № 30.

Поступила после переработки 12.03.2010 г.