

## ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА УСТАНОВОК ГАРАНТИРОВАННОГО ПИТАНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ РЕЖИМА ВОЗБУЖДЕНИЯ И ПЕРЕМЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ СЕТИ

Ю.А. Кусакин  
(представил д.т.н., проф. Б.Т. Кононов)

*Рассматриваются условия обеспечения устойчивости параллельной работы установок гарантированного питания. Приводятся критерии устойчивости и излагаются рекомендации, применение которых позволяет обеспечить поддержание требуемого качества электрической энергии у электроприёмников.*

Характеристики двигательного режима работы синхронной электрической машины определяются величинами напряжения возбуждения и напряжения сетевого ввода. При изменении этих параметров изменяется режим работы обратимой электрической машины, что проявляется в изменении величины тока возбуждения, изменяется напряжение на шинах гарантированного питания и в некоторых случаях возможно нарушение условий устойчивости параллельной работы. Влияние изменения напряжения при параллельной работе синхронных двигателей и синхронных генераторов исследовалось в [1 – 4]. Однако в [1, 2] синхронный двигатель рассматривался как приёмник электрической энергии и анализировалось его влияние на устойчивость нагрузки электрической системы. В [1] учитывались регулирующие возможности исследуемого объекта, однако генератор представлялся упрощенно в виде неявнополюсной машины. В [3, 4] учитывался характер распределения нагрузок при параллельной работе, и не анализировались свойственные только установкам гарантированного питания условия работы, заключающиеся в постоянной готовности принять на себя всю нагрузку системы электроснабжения.

Для определения условий возникновения критичных к изменению напряжения возбуждения и напряжения сети режимов, найдем экстремумы функций  $P_i$  и  $Q_i$ , с помощью которых выведем соотношения для оценки устойчивости рассматриваемой системы при изменении режима возбуждения  $E_i = \text{var}$  и переменном напряжении сети  $U = \text{var}$ . В двигательных режимах работы недовозбужденной или перевозбужденной обратимой электрической машины её активная мощность остается постоянной. Активную и реактивную мощность при параллельной работе

определим из соотношений:

$$\begin{aligned} P_i &= \frac{UE_i}{x_{di}} \cdot \sin \Theta_i + U^2 \frac{x_{di} - x_{qi}}{2x_{di}x_{qi}} \cdot \sin 2\Theta_i; \\ Q_i &= \frac{UE_i}{x_{di}} \cdot \cos \Theta_i + U^2 \frac{x_{di} - x_{qi}}{2x_{di}x_{qi}} \cdot \sin 2\Theta_i, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $Q_i$  – угол нагрузки  $i$ -й машины;  $x_{di}$ ,  $x_{qi}$  - продольные и поперечные реактивности  $i$ -й машины.

Используя (1), получим:

$$\begin{aligned} \frac{dP_i}{dE_i} &= \frac{U}{x_{di}} \cdot \sin \Theta_i + \frac{E_i U}{x_{di}} \cdot \cos \Theta_i \frac{d\Theta_i}{dE_i} + U^2 \cdot \frac{x_{di} - x_{qi}}{x_{di}x_{qi}} \cdot \cos 2\Theta_i \frac{d\Theta_i}{dE_i}; \\ \frac{dP_i}{dU} &= \frac{E_i}{x_{di}} \cdot \sin \Theta_i + \frac{E_i U}{x_{di}} \cdot \cos \Theta_i \frac{d\Theta_i}{dU} + \\ &+ U \left( \frac{x_{di} - x_{qi}}{x_{di}x_{qi}} \right) \cdot \sin 2\Theta_i + U^2 \left( \frac{x_{di} - x_{qi}}{x_{di}x_{qi}} \right) \cdot \cos 2\Theta_i \frac{d\Theta_i}{dU}; \\ \frac{dQ_i}{dE_i} &= \frac{U}{x_{di}} \cdot \cos \Theta_i - \frac{UE_i}{x_{di}} \cdot \sin \Theta_i \frac{d\Theta_i}{dE_i} - U^2 \left( \frac{x_{di} - x_{qi}}{x_{di}x_{qi}} \right) \cdot \sin 2\Theta_i \frac{d\Theta_i}{dE_i}; \\ \frac{dQ_i}{dU} &= \frac{E_i}{x_{di}} \cdot \sin \Theta_i + \\ &+ \frac{E_i U}{x_{di}} \cdot \cos \Theta_i \frac{d\Theta_i}{dU} + \frac{U(x_{di} - x_{qi})}{x_{di}x_{qi}} \cdot \sin 2\Theta_i + U^2 \frac{x_{di} - x_{qi}}{x_{di}x_{qi}} \cdot \cos 2\Theta_i \frac{d\Theta_i}{dU}. \end{aligned} \quad (2)$$

Исходя из условий работы установки гарантированного питания, учитывая, что  $P_i = \text{const}$ , определим из 1-го уравнения  $\frac{d\Theta_i}{dE_i}$ , из 2-го –  $\frac{d\Theta_i}{dU}$

и подставим результат соответственно в 3-е и 4-е уравнения системы (2):

$$\begin{aligned} \frac{d\Theta_i}{dU} &= - \frac{\sin \Theta_i}{E_i \cos \Theta_i + U \frac{x_{di} - x_{qi}}{x_{di}x_{qi}} \cdot \cos 2\Theta_i}; \\ \frac{d\Theta_i}{dE_i} &= - \frac{E_i \sin \Theta_i + U \frac{x_{di} - x_{qi}}{x_{di}x_{qi}} \cdot \sin 2\Theta_i}{E_i U \cos \Theta_i + U^2 \frac{x_{di} - x_{qi}}{x_{di}x_{qi}} \cdot \cos 2\Theta_i}; \\ \frac{dQ_i}{dE_i} &= \frac{E_i U x_{qi} + U^2 (x_{di} - x_{qi}) \cdot \cos \Theta_i}{E_i x_{di} x_{qi} \cdot \cos \Theta_i + U x_{di} (x_{di} - x_{qi}) \cdot \cos 2\Theta_i}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{dQ_i}{dU} = \frac{E_i^2 x_{qi} + U^2 x_{di} (x_{di} - x_{qi})^2 + 2E_i U \frac{x_{di} - x_{qi}}{x_{di}} \cdot \cos \Theta_i}{E_i x_{di} x_{qi} \cdot \cos \Theta_i + U x_{di} (x_{di} - x_{qi}) \cdot \cos 2\Theta_i} - \frac{E_i U \frac{x_{di} + x_{qi}}{x_{di}} \cdot \sin \Theta_i - U^2 \frac{x_{di}^2 - x_{qi}^2}{x_{di} x_{qi}} \cdot \sin 2\Theta_i}{E_i x_{di} x_{qi} \cdot \cos \Theta_i + U x_{di} (x_{di} - x_{qi}) \cdot \cos 2\Theta_i}.$$

Из (3) следует, что тенденция системы к неустойчивости проявляется при следующих условиях:

$$\frac{dQ_i}{dE_i} \rightarrow \infty; \quad \frac{dQ_i}{dU} \rightarrow \infty. \quad (4)$$

Критерии (4) справедливы при условии

$$E_i x_{qi} \cos \Theta_i + U (x_{di} - x_{qi}) \cdot \cos 2\Theta_i = 0. \quad (5)$$

Условие (5) имеет место при

$$\Theta_i = \arccos \frac{1}{2} \left[ \frac{-E_i x_{qi}}{2U(x_{di} - x_{qi})} + \sqrt{\frac{E_i^2 x_{qi}^2}{4U^2 (x_{di} - x_{qi})^2} + 2} \right]. \quad (6)$$

В практических расчётах при определении условия возникновения критического режима возможно использовать равенство

$$\Theta_i \approx \arccos \frac{U(x_{di} - x_{qi})}{E_i x_{qi}}. \quad (7)$$

Критический режим возникает при углах нагрузки, близких к  $90^\circ$ . Минимально допустимые значения  $E_{i\min}$  и  $U_{i\min}$ , при которых ещё сохраняется неизменной мощность работающей установки, определяются по следующим формулам:

$$E_{i\min} = \frac{P_i x_{di}}{U}; \quad U_{i\min} = \frac{P_i x_{di}}{E}. \quad (8)$$

При использовании для определения  $E_{i\min}$  и  $U_{i\min}$  системы относительных единиц следует учитывать, что в (8)  $P_i=1$  и  $U=1$ . Из (8) легко видеть, что при величине напряжения сетевого ввода, больше номинального значения, возможный диапазон изменения напряжения возбуждения расширяется. Вместе с тем, при увеличении напряжения сетевого ввода запас устойчивости системы в соответствии с (7) снижается. Следует также обратить внимание на тот факт, что у перевозбуждённой машины запас устойчивости системы по изменению напряжения больше, чем у недо возбуждённой машины. Этот вывод следует из второго уравнения условий (8).

При изменении величин напряжения сетевого ввода и напряжения возбуждения возможно изменение режима работы обратимой электри-

ческой машины и её переход в режим синхронного компенсатора при снижении напряжения сетевого ввода до критической величины  $U_{кр}$ , определяемой в соответствии с (1) по формуле

$$U_{кр} = \frac{2E_i x_{qi} \cdot \cos \Theta_i}{x_{di} + x_{qi} - (x_{di} - x_{qi}) \cdot \cos 2\Theta_i} \quad (9)$$

Изменение режима работы обратимой электрической машины при изменении величины напряжения сетевого ввода иллюстрируется экспериментальными данными, приведёнными в табл. 1.

Таблица 1

Параметры системы гарантированного питания типа АСГП-630  
в условиях изменения напряжения сетевого ввода

Наименование параметра	$U_c = 436 \text{ В}$		$U_c = 396 \text{ В}$		$U_c = 386 \text{ В}$	
	Нагрузка ШГП		Нагрузка ШГП		Нагрузка ШГП	
	XX	700 кВт при $\cos\varphi=0,8$	XX	700 кВт при $\cos\varphi=0,8$	XX	700 кВт при $\cos\varphi=0,8$
Активная нагрузка генератора $P_r$ , кВт	-45	-45	-45	-45	-45	-45
Реактивная нагрузка генератора $Q_r$ , кВт	-355	45	275	580	425	735
Напряжение на ШГП $U_{шгп}$ , В	426	417	403	391	398	385
Ток ротора $I_p$ , А	65	100	130	165	148	185
Напряжение цепи возбуждения $U_p$ , В	16,8	22,4	29,5	35,8	32,8	38,8
Ток статора генератора $I_{ст}$ , А	370	0	400	840	610	1100

Из табл. 1 следует, что перевозбуждённая обратимая электрическая машина способна отдавать реактивную энергию и обеспечивать ею не только потребности системы электроснабжения, но и генерировать её во внешнюю сеть. Это свойство обратимой электрической машины представляется чрезвычайно важным, поскольку позволяет по-новому подойти к вопросу проектирования электрических сетей и всей системы электроснабжения в целом. Производство реактивной энергии обратимой электрической машиной позволяет увеличить величину активной мощности, передаваемой по линиям электропередачи, уменьшить сечение кабельных и воздушных линий электропередачи, снизить величину потерь электрической энергии при её передаче на расстояние и повысить качество электрической энергии на шинах гарантированного питания. Рассмотренные свойства системы гарантированного питания с обратимой электрической машиной являются уникальными и позволяют обеспечить существенный технико-экономический эффект при её внедрении в специальных системах электроснабжения.

При исследовании параллельной работы установок гарантированного питания необходимо обратить внимание и на особенности работы её роторных цепей, проявляющиеся в существенном изменении величины тока и

напряжения возбуждения при изменении напряжения сетевого ввода. Так, например, в системе гарантированного питания типа АСП-630 в случае, когда разность между установкой напряжения генератора в режиме холостого хода и напряжением сети составила величину, равную + 30 В, ток статора при ненагруженных шинах был равен 80 0А, а ток ротора – 230 А. В этих же условиях при номинальной нагрузке шин гарантированного питания ток статора был равен 1250 А, а ток ротора – 270 А. В обоих случаях работа установки гарантированного питания сопровождалась существенной перегрузкой цепей ротора. При разности между установкой напряжения генератора в режиме холостого хода и напряжением сети, равной минус 30 В, ток статора при ненагруженных шинах был равен 730 А, а ток ротора – 15 А. В этих же условиях при номинальной нагрузке шин гарантированного питания ток статора был равен 440 А, а ток ротора – 45 А. Тем самым, как в режиме холостого хода, так и в режиме номинальной нагрузки, роторные цепи обратной электрической машины размагничивались.

Величина тока возбуждения зависит не только от разности между электродвижущей силой генератора и напряжением сетевого ввода, но и от статизма системы гарантированного питания. Используя (1) и (2), получим зависимость для определения тока ротора

$$I_{pi} = \frac{(E_i - U) \cdot x_{di}}{S_{U1} \cdot x_{adi} \cdot \cos \Theta_i} - \frac{U}{2 \cos \Theta_i \cdot x_{adi}} \cdot \left( \frac{x_{di} + x_{qi}}{x_{qi}} - \frac{x_{di} - x_{qi}}{x_{qi}} \cdot \cos 2\Theta_i \right). \quad (10)$$

Из (10) следует, что величина перегрузки роторных цепей обратной электрической машины определяются разностью  $E_i - U$  и величиной статизма её внешней характеристики. Чем меньше статизм, тем больше перегрузка цепи ротора. Поэтому естественно стремление увеличить статизм установки при её работе в двигательном режиме. Анализ (10) позволил предложить способ управления дизель-инерционной установкой гарантированного питания, в соответствии с которым изменяют величину статизма в зависимости от режима работы синхронной электрической машины. Увеличение статизма увеличивает запас устойчивости по напряжению и обеспечивает защиту роторных цепей обратной электрической машины. Вместе с тем, увеличение статизма снижает возможность синхронной электрической машины по стабилизации напряжения на шинах гарантированного питания при изменении напряжения сетевого ввода.

В табл. 2 приведены экспериментальные данные, используя которые возможно построить статические характеристики двух систем гарантированного питания типа СГЭП-500 с генераторами типа СГДМ-11-46-4.

На рис. 1 приведена статическая характеристика системы гарантированного питания типа СГЭП-500, снятая при  $S_{u1} = 5\%$  и  $S_{u2} = 11\%$ . На рис. 2 приведена зависимость отклонения напряжения на шинах гарантированного питания системы СГЭП-500 от разности  $U_r - U_c$  при  $S_{U1} = 5\%$  и  $S_{U2} = 11\%$ .

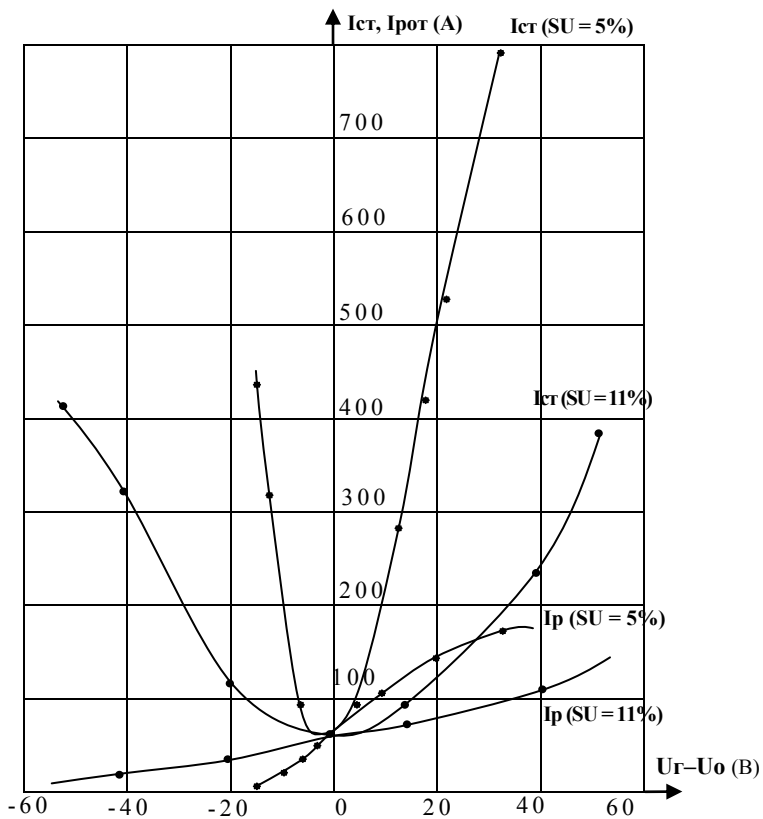


Рис. 1. Зависимость токов статора и ротора от выбора уставки регулятора напряжения

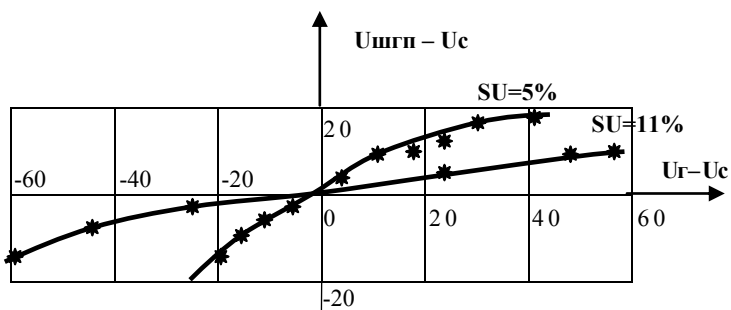


Рис. 2. Зависимость изменения напряжения на шинах гарантированного питания от изменения уставки регулятора напряжения



Анализ результатов, приведённых в табл. 2 и графиков, изображённых на рис. 1 и 2, подтверждает необходимость введения в установку гарантированного питания защиты цепей ротора обратимой электрической машины по максимально и минимально допустимому значению тока возбуждения. Эти же данные свидетельствуют о неоднозначности влияния изменения статизма на работу системы гарантированного питания. Так, при величине статизма  $S_U$ , равной 11 %, возможности генератора системы СГЭП-500 по стабилизации напряжения используются не в полном объёме, а отклонения напряжения сетевого ввода в диапазоне  $+ 11 \% \div -14,25 \%$  приводят при номинальной установке генератора, равной 400 В, к отклонению напряжения шин гарантированного питания в пределах  $+ 9 \% \div - 12 \%$ . В этой же системе при работе со статизмом  $S_U$ , равным 5 %, отклонения напряжения сетевого ввода в пределах  $+ 4,25 \% \div - 10 \%$  приводят к отклонению напряжения шин гарантированного питания в пределах  $+ 2,25 \% \div - 5,5 \%$ . Для оценки величины отклонения напряжения на шинах гарантированного питания в условиях изменения нагрузки при электроснабжении от сетевого ввода, возможно, использовать выражение

$$\delta U = \frac{P_c r_n + Q_n x_n}{U}, \quad (11)$$

где  $P_c = P_n + P_m$  - суммарная активная мощность нагрузки и обратимой электрической машины.

В соответствии с (11) работа обратимой электрической машины в режиме синхронного компенсатора позволяет уменьшить отклонение напряжения

$$\delta U = \frac{P_c r_n + (Q_n - Q_m) \cdot x_n}{U}, \quad (12)$$

где  $Q_m$  - величина реактивной мощности, генерируемой обратимой электрической машины.

Снижение статизма до значений, меньше 5 %, позволяет еще в большей степени обеспечить стабилизацию напряжения на шинах гарантированного питания, однако при малых значениях статизма система оказывается неработоспособной из-за перегрузки её роторных цепей. Следует иметь в виду, что в случае, когда напряжение сетевого ввода больше, чем величина установки напряжения генератора  $U_c > U_r$ , уменьшение статизма в соответствии с (8) и (10) может привести к нарушению устойчивости работы установки гарантированного питания. При работе системы СГЭП-500 в условиях, когда  $U_c > U_r$  и  $S_U = 5\%$ , ток ротора падает до нуля при разности напряжений сети и генератора, равной 17 В. В этом случае генератор потребляет ток, равный 425 А и реактивную мощность, равную 275 кВар, а напряжение на шинах гарантированного питания устанавливается на 9 В ниже напряжения сети и на 8 В выше установки напряжения генератора. При статизме, равном 10 %, разности напряжения сети и генератора, равной 44 В, ток ротора снижается до 15 А, ток статора равен 315 А, а потребляемая мощность рав-



на 200 кВар. В этом случае напряжение на шинах гарантированного питания устанавливается на 36 В выше установки напряжения генератора и всего на 8 В ниже напряжения сети. Снижение напряжения возбуждения может иметь место не только при повышении напряжения на вводе внешней сети, но и при коротком замыкании на шинах гарантированного питания. В связи с тем, что причины этого явления могут быть разными, должны быть разными и принимаемые меры по локализации происходящего размагничивания ротора. Это обстоятельство положено в основу предложенного способа автоматического управления системой гарантированного питания [5], в соответствии с которым при снижении напряжения возбуждения отключают корректор напряжения и в зависимости от того, восстанавливается ли напряжение возбуждения или нет, переводят систему в режим автономной работы или отключают её и переходят на другую систему. В режиме автономной работы установки гарантированного питания с целью обеспечения стабильности вырабатываемого напряжения необходимо установить минимальный статизм генератора. Повышение качества напряжения на шинах гарантированного питания достигается и путём применения специальных мероприятий, целью которых является устранение взаимного влияния различных электроприёмников. Ослабление взаимного влияния различных электроприёмников достигается применением со стороны питающего ввода трёхобмоточного трансформатора, у которого имеются две вторичные обмотки, выполненные на одинаковые напряжения. Тем самым исключается гальваническая связь между электроприёмниками, включёнными на разные секции шин гарантированного питания. Эффект стабилизации напряжения особо существенен в случае, когда нагрузка системы носит резко переменный характер, т.е. когда имеют место частые включения и выключения электроприёмников, мощность которых соизмерима с мощностью источника питания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Маркович И.М. *Оптимизация режимов энергетических систем*. – М.: МЭИ, 1967. – 424 с.
2. *Электрические системы. Том 1 / Под ред. В.А. Веникова*. – М.: Высш. шк., 1970. – 334 с.
3. Веников В.А. *Переходные электрические процессы в электрических системах*. – М.: Высш. шк., 1970. – 472 с.
4. Казовский Е.Я. *Переходные процессы в электрических машинах переменного тока*. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1962. – 624 с.
5. *Способ автоматического управления системой гарантированного питания / Кононов Б.Т. и др.* – АС СССР № 1621120, БИ № 2, 1991.

Поступила 25.08.2002

**КУСАКИН Юрий Александрович**, начальник факультета ХВУ. В 1986 году окончил Харьковское ВВКИУ. Область научных интересов – источники гарантированного питания.