

Ю. М. Астапович, канд. техн. наук, **Н. П. Митяшин**, д-р техн. наук, проф., mityashinnp@mail.ru,

Ю. Б. Томашевский, д-р техн. наук, проф., yurytomash@mail.ru,

Е. Е. Миргородская, канд. техн. наук, доц., mee85@inbox.ru,

А. В. Денисов, аспирант, denisov_alex.v@mail.ru

Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.

Управление структурой гибкой системы электропитания

Рассматривается организация электропитания нагрузки с помощью группового преобразователя с управляемой модульной структурой. Это позволит исключить неэффективную работу преобразователя при минимальной нагрузке и обеспечивать необходимый запас мощности при нагрузке, близкой к максимальной.

Ключевые слова: групповой преобразовательный комплекс, модуль, структура, оптимизация, критерии, управление, гибкость, эффективность, моделирование

Введение

Для ряда технологических процессов требуются источники питания переменного напряжения на частотах, отличных от общепромышленной. При этом нагрузка изменяется в широких пределах, что требует наличия на одном предприятии широкой гаммы источников соответствующих мощностей. В этих условиях полезными оказываются групповые преобразовательные комплексы (ГПК), образованные объединением выходных полюсов нескольких преобразовательных модулей (ПМ) ограниченного мощностного ряда. Такой подход к организации электропитания позволяет получить и другие преимущества: повышение живучести системы, удешевление резервирования, получение возможности в реальном масштабе времени изменять мощность работающего оборудования в целях адаптации к величине и характеру нагрузки [1].

Основными задачами при применении ГПК в системах электроснабжения являются распределение загрузки работающих ПМ, согласованной с их номинальными мощностями, и обеспечение наилучших энергетических и качественных показателей при изменении нагрузки в широких пределах. Существенно, что эти задачи необходимо решать в реальном масштабе времени.

В ряде известных схемных решений ГПК с изменяемой структурой достигается автоматическое распределение нагрузки между ПМ пропорционально их номинальным мощностям [2]. Рассмотрим метод такого автоматического распределения.

Пусть имеется n ПМ, включенных параллельно на общую нагрузку. Поскольку в нашем случае ПМ объединены по выходу, то распределение мощности между ними в заданной пропорции равносильно соответствующему распределению их выходных токов:

$$P_k/P_j = I_k^H/I_j^H.$$

Пусть ток j -го источника I_j является линейной функцией соответствующей управляющей величины α_j , т. е.

$$I_j = b\alpha_j.$$

Распределение токов зададим положительными параметрами $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$, пропорциональными номинальным значениям токов соответствующих ПМ, такими что

$$\gamma_k > 0; \gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_n = 1.$$

При этом в установившемся режиме для токов I_k и I_j любых двух ПМ должно выполняться условие

$$I_k/I_j = I_k^H/I_j^H = \gamma_k/\gamma_j.$$

Для реализации такого распределения снабдим каждый ПМ пропорциональным регулятором, так что

$$\alpha_j = \kappa_{\Gamma}\varepsilon_j,$$

где κ_{Γ} — коэффициент усиления регулятора, $\varepsilon_j = I_j^0 - I_j$ — ошибка регулирования j -го источника, причем уставка I_j^0 вычисляется следующим образом:

$$I_j^0 = \gamma_j I^0.$$

Здесь $I^0 = \sum_{i=1}^n I_i$ — суммарный ток всех источников.

Отсюда

$$\varepsilon_j = I_j^0 / (1 + b\kappa_{\Gamma}).$$

Следовательно, при достаточно большом значении коэффициента усиления регулятора κ_{Γ} величину ε_j можно считать близкой к нулю, т. е.

$$I_j \approx I_j^0 = \gamma_j I^0,$$

что обеспечивает заданное распределение нагрузки.

Недостатком такого метода распределения является тот факт, что последнее условие выполняется не только в номинальных режимах, но и в режимах, близких к холостому ходу, что приводит к снижению энергетических показателей системы электропитания.

Проблема может быть решена за счет перехода к системе с гибкой структурой, перестраиваемой с изменением нагрузки [3]. Эта система должна следить за значением нагрузки и обеспечивать соответствующие отключения или подключения ПМ, так чтобы обеспечивались надежность и высокие энергетические показатели всего комплекса.

Постановка задачи

Из сказанного следует целесообразность такого изменения набора работающих преобразовательных модулей K при выборе его из общего множества преобразователей N , чтобы при текущей потребляемой мощности P , во-первых, обеспечивался необходимый запас по мощности и, во-вторых, средние значения энергетических показателей системы преобразования были близки к оптимальным. Далее возможные реализации наборов K будем называть *компоновками*.

Обозначим N/K — набор преобразователей из N , не подключенных к нагрузке в рассматриваемый момент, P_N и P_K — номинальные значения мощности преобразователей из N и K , т. е.

$$P_N = \sum_{i \in N} P_i, P_K = \sum_{i \in K} P_i.$$

Пусть далее ΔP — требуемое значение запаса мощности, на которое мощность P_K должна превышать мгновенное значение мощности P нагрузки для надежного электроснабжения.

Для реализации предлагаемой системы помимо элементов, используемых в известных ГПК, должен быть предусмотрен блок управления структурой (БУС) комплекса, назначение которого состоит в принятии решений по отключению и подключению ПМ к нагрузке и их осуществлении таким образом, чтобы выполнялось условие:

$$P + \Delta P < P_K < P + \Delta P', \quad (1)$$

где ΔP — допустимое с точки зрения эффективности преобразования превышение мощности P_K над мгновенной мощностью нагрузки P ($\Delta P' > \Delta P$).

В простейшем случае функционирование БУС сводится к следующему. При нарушении левого неравенства БУС выбирает из множества N/K такой минимальный по мощности набор преобразователей M_1 , подключение которого восстанавливает его выполнение, но не нарушает правое неравенство. Наоборот, в случае нарушения правого неравенства БУС выбирает из множества K такой максимальный по мощности набор преобразователей M_2 , подключение которого восстанавливает его выполнение, но не нарушает левое неравенство.

Преимущество такого способа функционирования БУС состоит в том, что переход от компоновки, не удовлетворяющей неравенству (1), к новой компоновке, ему удовлетворяющей, сводится к отключению или подключению единственного ПМ. Его недостатком является то, что помимо получаемой этим способом компоновки могут существовать

другие компоновки, удовлетворяющие неравенству (1), но достигаемые несколькими переключениями ПМ. При этом некоторые из них могут обеспечивать более высокие средние значения энергетических показателей системы преобразования.

В связи с этим в настоящей работе решаются следующие задачи:

- построение математических моделей структуры компоновки и коммутаций компоновок;
- формализация критериев, характеризующих степень соответствия компоновки ГПК текущей нагрузке, и критериев качества коммутаций;
- разработка алгоритмов оптимизации процесса управления структурой по введенным критериям.

Математическая модель структуры

Для исследования и параметрической оптимизации предлагаемой гибкой системы необходимо построить ее математическую модель. Будем рассматривать гибкий преобразовательный комплекс общего вида, модулями могут служить любые устройства силовой электроники, допускающие объединение по выходу: инверторы, выпрямители, импульсные преобразователи и т. п. Число модулей, входящих во множества N , обозначим n , причем считаем, что это число не превосходит 5. Это не снижает общности рассуждений и последующих математических конструкций, изменяя лишь их размерность.

Очевидно, число возможных компоновок преобразователя равно 2^n , т. е. в наших предположениях не превышает $2^5 = 32$. При разумном подборе мощностей модулей из множества N можно достаточно равномерно распределить мощности компоновок во всем диапазоне нагрузок [4], однако в данном случае этого не предполагается. Иными словами считается, что набор мощностей модулей произволен, что соответствует наиболее частым практическим ситуациям.

Модель структуры компоновки

Структура компоновки группового преобразователя удобно задать в виде s -разрядного кода, где s — число различных значений мощностей модулей, входящих в множество N . Здесь мы учитываем, что в N могут иметься несколько идентичных модулей для всех или некоторых значений мощностей. Располагая мощности модулей в порядке возрастания, представим произвольную компоновку \hat{k} в виде кода

$$\hat{k} = (k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_s),$$

где k_i — число модулей, входящих в компоновку \hat{k} и имеющих мощность P_i . При этом считаем, что если $i > j$, то $P_i > P_j$, т. е. номер разряда увеличивается с увеличением мощности. Если число модулей, входящих в N , имеющих мощность P_i , равно n_i , то значение k_i может принимать любое целое значение от 0 до n_i .

Мощность всей компоновки, очевидно, равна

$$P_{\hat{k}} = \sum_{i=1}^s k_i P_i,$$

причем мощность полной компоновки, т. е. содержащей все модули, равна

$$P_N = \sum_{i=1}^s n_i P_i.$$

В частном случае, когда все модули в N имеют различные мощности, рассматривается двоичный код, так как k_i может принимать только два значения: 0 и 1, а код имеет n разрядов. Если же все модули имеют одну и ту же мощность, то получаем одноразрядный код, причем единственный разряд может принимать значения от 1 до n .

Модель коммутации компоновок

В процессе управления структурой ГПК возникает необходимость реализовывать переход от одной компоновки к другой. Такой переход естественно назвать *коммутацией компоновок*.

Рассмотрим коммутацию $\hat{k}_1 \rightarrow \hat{k}_2$, где \hat{k}_1 — исходная, а \hat{k}_2 — конечная компоновки, причем

$$\hat{k}_1 = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_i, \dots, \xi_n);$$

$$\hat{k}_2 = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_i, \dots, \eta_n).$$

Формально вычитая поразрядно первый код из второго, находим

$$\Delta = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_i, \dots, \delta_n),$$

где $\delta_i = \eta_i - \xi_i$.

Код Δ можно считать моделью коммутации компоновок, поскольку он содержит полную информацию о том, какие и сколько модулей следует подключить (при $\delta_i > 0$), отключить (при $\delta_i < 0$) или оставить в компоновке (при $\delta_i = 0$).

Общее число переключаемых ПМ при данной коммутации можно подсчитать по формуле

$$C(\hat{k}_1 \rightarrow \hat{k}_2) = \sum_{i=1}^n |\delta_i|. \quad (2)$$

Эта величина может выступать критерием оценки коммутаций.

Степень соответствия компоновки ГПК текущей нагрузке

Введем следующие обозначения, используемые ниже при описании алгоритма работы блока управления структурой ГПК:

P — текущая мощность нагрузки;

$P_{\hat{k}}$ — мощность компоновки \hat{k} преобразователя;

$\Delta P_{1кр}$ — минимально допустимое значение запаса мощности $P_{\hat{k}}$ по отношению к мощности P ;

$\Delta P_{1н}$ — номинальное значение запаса мощности $P_{\hat{k}}$;

$\Delta P_{2н}$ — максимально допустимое значение превышения мощности $P_{\hat{k}}$ над мощностью P ;

$M_1(P_{\hat{k}}, P)$ — степень соответствия мощности компоновки $P_{\hat{k}}$ требованию по запасу мощности по отношению к P ;

$M_2(P_{\hat{k}}, P)$ — степень соответствия мощности $P_{\hat{k}}$ требованию по допустимому превышению по отношению P (по ограничению запаса мощности);

$M(P_{\hat{k}}, P)$ — степень общего соответствия мощности $P_{\hat{k}}$ значению P .

Функции M_1 , M_2 , $M(P_{\hat{k}}, P)$ принимают значения в диапазоне от 0 до 1, причем большим значениям каждой из этих функций соответствует большая степень соответствия компоновки $P_{\hat{k}}$ мощности нагрузки с точки зрения конкретного требования. Значениям 0 и 1 функции отвечают ситуации безусловного несоответствия или безусловного соответствия этим требованиям.

Определение допустимости компоновки \hat{k} по отношению к требованию запаса мощности

Простейший алгоритм работы БУС, описанный выше, использующий четко заданные границы переключений модулей, целесообразно обобщить, задав более гибкие условия для определения смены компоновок. Цель такого обобщения состоит в создании условий для учета конкретной динамики нагрузки и возможности уменьшения числа переключений модулей.

Область мощности компоновки $P_{\hat{k}}$, в которой степень ее соответствия требованию по запасу мощности не равна нулю, зададим с помощью функции

$$M_1(P_{\hat{k}}, P) = \begin{cases} 0 & \text{при } P_{\hat{k}} < P_{1кр}; \\ \frac{P_{\hat{k}} - P_{1кр}}{P_{1н} - P_{1кр}} & \text{при } P_{1кр} < P_{\hat{k}} < P_{1н}; \\ 1 & \text{при } P_{\hat{k}} \geq P_{1н}. \end{cases}$$

Здесь $P_{1кр} = P + \Delta P_{1кр}$; $P_{1н} = P + \Delta P_{1н}$, причем $P_{1н} > P_{1кр}$, так как $\Delta P_{1н} > \Delta P_{1кр}$. График функции $M_1(P_{\hat{k}}, P)$ показан на рис. 1.

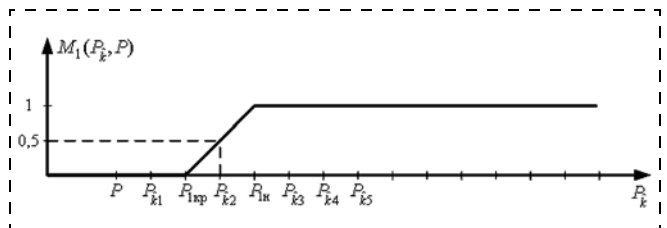


Рис. 1. Функция степени соответствия компоновки требованию по запасу мощности

В соответствии с этим графиком компоновка \hat{k}_1 не соответствует требованию по запасу мощности, поскольку $M_1(P_{\hat{k}_1}, P) = 0$, компоновки $\hat{k}_3, \hat{k}_4, \hat{k}_5$ соответствуют этому требованию полностью, так как для $i = 3, 4, 5$ $M_1(P_{\hat{k}_i}, P) = 1$, а компоновка \hat{k}_2 соответствует требованию со степенью 0,5.

При изменении мощности P график $M_1(P_{\hat{k}}, P)$ двигается вправо (при увеличении P) или влево (при уменьшении P). Поскольку мощности компоновок $P_{\hat{k}}$ не изменяются, степень их соответствия указанному требованию изменяется.

Определение допустимости компоновки \hat{k} по отношению к требованию ограничения запаса мощности

Функцию $M_2(P_{\hat{k}}, P)$, задающую степень соответствия компоновки $P_{\hat{k}}$ требованию по допустимому превышению мощности, введем с помощью следующей формулы:

$$M_2(P_{\hat{k}}, P) = \begin{cases} 1 & \text{при } P_{\hat{k}} < P_{2н}; \\ \frac{P_{2кр} - P_{\hat{k}}}{P_{2кр} - P_{2н}} & \text{при } P_{2н} < P_{\hat{k}} < P_{2кр}; \\ 1 & \text{при } P_{\hat{k}} \geq P_{2кр}. \end{cases}$$

Здесь $P_{2кр} = P + \Delta P_{2кр}$; $P_{2н} = P + \Delta P_{2н}$, причем $P_{2кр} > P_{2н}$, так как $\Delta P_{2кр} > \Delta P_{2н}$. График функции $M_2(P_{\hat{k}}, P)$ показан на рис. 2.

В соответствии с определением компоновки $\hat{k}_1, \hat{k}_2, \hat{k}_3$ полностью удовлетворяют указанному требованию, компоновка \hat{k}_5 ему не удовлетворяет, а компоновка \hat{k}_4 соответствуют ему со степенью 0,4.

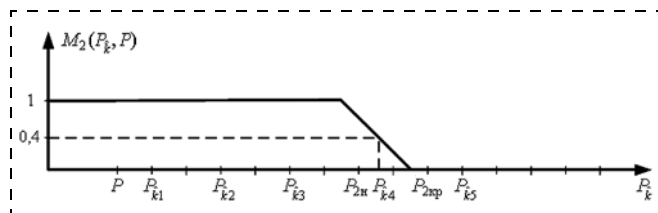


Рис. 2. Функция степени соответствия компоновки требованию по ограничению запаса мощности

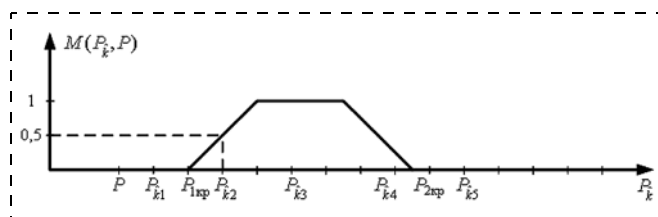


Рис. 3. Функция степени допустимости компоновок

Область допустимости компоновки

Функции $M_1(P_{\hat{k}}, P)$ и $M_2(P_{\hat{k}}, P)$ можно рассматривать как функции принадлежности компоновки \hat{k} к нечеткому множеству K_1 компоновок, допустимых по отношению к требованию запаса мощности, и к нечеткому множеству K_2 компоновок, допустимых по отношению к требованию по ограничению запаса мощности, соответственно [5]. Но компоновка \hat{k} допустима, если она удовлетворяет текущей мощности нагрузки по обоим требованиям. Поэтому множество допустимых компоновок K является пересечением указанных нечетких множеств:

$$K = K_1 \cap K_2.$$

В соответствии с алгеброй нечетких множеств [5] функция принадлежности множества допустимых компоновок задается функцией

$$M(P_{\hat{k}}, P) = \min(M_1(P_{\hat{k}}, P), M_2(P_{\hat{k}}, P)).$$

График функции $M(P_{\hat{k}}, P)$ показан на рис. 3.

Из этого графика следует, что компоновки \hat{k}_1, \hat{k}_5 являются недопустимыми, компоновка \hat{k}_3 допустима полностью, а \hat{k}_2, \hat{k}_4 допустимы со степенями 0,5 и 0,4 соответственно.

Алгоритмы управления структурой ГПК

Управление структурой ГПК сводится к решению следующих задач:

1. Определение необходимости изменения структуры, т. е. коммутации от исходной компоновки \hat{k}_s к новой \hat{k}_t , наилучшим образом соответствующей текущей нагрузке по критерию $M(P_{\hat{k}}, P)$.
2. Нахождение оптимальной последовательности переключений ПМ при реализации коммутации $\hat{k}_s \rightarrow \hat{k}_t$ по одному из рассмотренных ниже критериев.
3. Аппаратная реализация коммутации.

Определение необходимости осуществления коммутации

Для определения необходимости коммутаций компоновок на каждом такте работы БУС выполняется следующий алгоритм.

1. Для действующей в текущий момент компоновки \hat{k}_s определяется степень ее допустимости $M(P_{\hat{k}_s}, P)$.
2. Если $M(P_{\hat{k}_s}, P) = 1$, алгоритм осуществляет переход к пункту 4.

3. Ищутся компоновки \hat{k} , для которых $M(P_{\hat{k}}, P) > M(P_{\hat{k}_s}, P)$.

Если множество таких компоновок не пусто, то выбирается та из них \hat{k}_t , для которой минимально число переключений модулей $C(\hat{k}_s \rightarrow \hat{k}_t)$, необходимых для осуществления коммутации $\hat{k}_s \rightarrow \hat{k}_t$, рассчитываемое по формуле (2). После этого выполняется переход к пункту 4.

Если компоновки \hat{k} , для которых $M(P_{\hat{k}}, P) > M(P_{\hat{k}_s}, P)$, не существуют, то это означает, что текущая компоновка оптимальна по критерию $M(P_{\hat{k}}, P)$. Выполняется переход к пункту 4.

4. Конец алгоритма.

Траектории коммутаций и критерии для их оценки

Все множество возможных компоновок и коммутаций удобно изобразить в виде модулей, тогда коммутациям $\hat{k}_i \rightarrow \hat{k}_j$ соответствуют траектории из вершины-компоновки \hat{k}_i в вершину-компоновку \hat{k}_j . Матрица смежности такого графа для трехмодульного комплекса показана на рис. 4. Заголовки строк и столбцов здесь соответствуют кодам компоновок, так что номер строки равен десятичному значению двоичного кода. Например, \hat{k}_5 есть код 101, т. е. соответствует компоновке, содержащей первый и третий модули. В заполненных ячейках матрицы записаны длительности переходных процессов соответствующих переключений, свободные ячейки соответствуют коммутациям, не сводящимся к переключению единственного ПМ.

При каждом переключении ПМ в ГПК и соответствующем изменении значений коэффициентов $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ возникает электромагнитный переходный процесс (ПП). Поскольку уставки системы распределения формируются самой системой и изменяются в процессе регулирования, то установившийся режим наступает тогда, когда они достигают требуемых значений одновременно с регулируемые токами. Контур стабилизации выходного напряжения преобразователей в качестве регулирующих органов использует те же силовые ключи, что и система распределения, в силу чего обе системы являются друг для друга возмущающими факторами. По этой причине изменения структуры реализуются БУС с установленной задержкой во времени относительно моментов нарушения условий (1) для того, чтобы избежать наложения переходных процессов в обеих системах.

Таким образом, во избежание аварийных режимов целесообразно выполнять переключения ПМ, требуемые данной коммутацией, отдельно во времени в некоторой последовательности с задержками, достаточными для затухания соответствующих ПП.

	\hat{k}_0	\hat{k}_1	\hat{k}_2	\hat{k}_3	\hat{k}_4	\hat{k}_5	\hat{k}_6	\hat{k}_7
\hat{k}_0		τ_{01}	τ_{02}		τ_{04}			
\hat{k}_1	τ_{10}			τ_{13}		τ_{15}		
\hat{k}_2	τ_{20}			τ_{23}			τ_{26}	
\hat{k}_3		τ_{31}	τ_{32}					τ_{37}
\hat{k}_4	τ_{40}					τ_{45}	τ_{46}	
\hat{k}_5		τ_{51}			τ_{54}			τ_{57}
\hat{k}_6			τ_{62}		τ_{64}			τ_{67}
\hat{k}_7				τ_{73}		τ_{75}	τ_{76}	

Рис. 4. Матрица графа возможных компоновок и коммутаций трехмодульного ГПК

При этом реализации коммутаций, содержащих более одного переключения ПМ, неоднозначны из-за порядка, в котором они проводятся. Возможные варианты этих реализаций назовем *траекториями коммутаций*. Для выбора конкретной траектории коммутации необходимо ввести критерии их оценки. Рассмотрим возможные критерии для оценки таких последовательностей.

Каждое переключение ПМ требует затрат времени на затухание соответствующего переходного процесса. Это время в общем случае определяется исходной и конечной компоновками, переключаемым модулем и характером переключения (знаком δ_j). Выше это время обозначено как τ_{ij} , где i, j — номера исходной и конечной компоновок переключения. Это позволяет рассматривать граф как взвешенный, в котором вес дуги равен длительности переходного процесса переключения соответствующего модуля τ_{ij} .

Поскольку переключения модулей предполагается проводить последовательно, то каждая конкретная траектория, реализующая коммутацию $\hat{k}_s \rightarrow \hat{k}_t$, получает аддитивную оценку, равную минимально допустимому времени, затрачиваемому на нее. Так что, если траектория θ , реализующая коммутацию $\hat{k}_s \rightarrow \hat{k}_t$, имеет вид

$$\theta = k_s \xrightarrow{\tau_{s1}} k_1 \xrightarrow{\tau_{21}} \dots \xrightarrow{\tau_{i-1i}} k_i \xrightarrow{\tau_{ii+1}} \dots \xrightarrow{\tau_{i+1i+2}} k_{i+1} \xrightarrow{\tau_{t-2t-1}} \dots \xrightarrow{\tau_{t-1t}} k_t$$

где k_t — промежуточные компоновки, то оценка этой траектории по длительности переходного процесса равна

$$\tau(\theta) = \sum_{i=s}^{t-1} \tau_{ii+1}$$

Рассмотренный критерий является аддитивным, т. е. его значение для коммутации компоновок равно сумме его значений для переключений модулей,

входящих в коммутацию компонок. Другими примерами аддитивных критериев являются критерии оценки коммутаций компонок по числу переключений модулей, по суммарной мощности переключаемых модулей, по числу колебаний выходного напряжения ГПК за время затухания переходного процесса.

Поиск траектории, оптимальной по одному из аддитивных критериев, сводится к классической задаче поиска минимального пути во взвешенном ориентированном графе. Известен алгоритм Дейкстры, эффективно решающий данную задачу. Однако поскольку определение оптимальной траектории коммутаций необходимо решать в реальном времени, целесообразно иметь готовые решения для всех возможных коммутаций, прошитые в памяти БУС.

Примером неаддитивных критериев может служить максимальное перерегулирование [6], взятое по всем переходным процессам, вызванным переключениями модулей при реализации данной коммутации, а также максимальная мощность модуля, участвующего в коммутации. Оптимальные траектории по этим критериям находятся методом перебора.

В более простом варианте можно ограничиться субоптимальными траекториями, удовлетворяющими следующим условиям.

1. Переход от одной компоновки к другой выполняется последовательным подключением или отключением единичных модулей с задержкой на время затухания соответствующего переходного процесса.

2. Последовательность переключений модулей должна быть такой, чтобы мощность ни одной из возникающих промежуточных компонок не уступала минимальной из мощностей начальной и конечной компонок.

3. Целесообразно проводить переключения в такой последовательности, чтобы отношение мощности переключаемого модуля к мощности исходной промежуточной компоновки была минимальна.

Первое условие обеспечивает исключение наложения переходных процессов в модулях, которые приводят к увеличению перерегулирования переходных процессов.

Второе условие связано с обеспечением надежности работы преобразователя в переходном режиме.

Выполнение третьего условия способствует снижению времени переходных процессов при каждом переключении.

Все три сформулированных условия будут выполнены, если переключения будут осуществляться в следующей последовательности.

1. Сначала проводятся все требуемые подключения, причем в порядке увеличения мощности модулей.

2. Модули одного типа (т. е. одной мощности) подключаются в любой последовательности.

3. После подключения всех модулей проводятся все требуемые отключения модулей в порядке уменьшения мощности модулей.

Моделирование смены компоновки

Эффективность алгоритмов проверена с помощью разработанной компьютерной модели системы с переменной структурой для преобразователя с пятью модулями. На рис. 5 приведены результаты работы программы.

Моделирование проводилось при следующих параметрах комплекса. Фильтр: $L_f = L_d = 10$ мГн, $C_f = 3000$ мкФ, максимальная емкость коммутирующей батареи $C = 900$ мкФ, индуктивность компенсатора $L_k = 100$ мкГн, частота $f = 200$ Гц.

Результаты моделирования отображают следующие процессы в системе: при $n < 1000$ нагрузка номинальная, система распределяет потребляемые токи и, следовательно, мощность между преобразователями в соответствии с исходными значениями коэффициентов $\gamma_1 = 0,3$, $\gamma_2 = 0,1$, $\gamma_3 = 0,4$, $\gamma_4 = 0,2$, $\gamma_5 = 0$. В момент $n_1 = 1000$ происходит резкое уменьшение нагрузки. В момент $n_2 = 1150$ отключается третий преобразователь и реализует новые значения коэффициентов $\gamma_1 = 1/2$, $\gamma_2 = 1/6$, $\gamma_3 = 0$, $\gamma_4 = 1/3$, $\gamma_5 = 0$. В момент $n_3 = 1250$ происходит увеличение нагрузки. В момент $n_4 = 1350$ подключается пятый преобразователь и реализует новые значения коэффициентов $\gamma_1 = 30/85$, $\gamma_2 = 10/85$, $\gamma_3 = 0$, $\gamma_4 = 20/85$, $\gamma_5 = 25/85$.

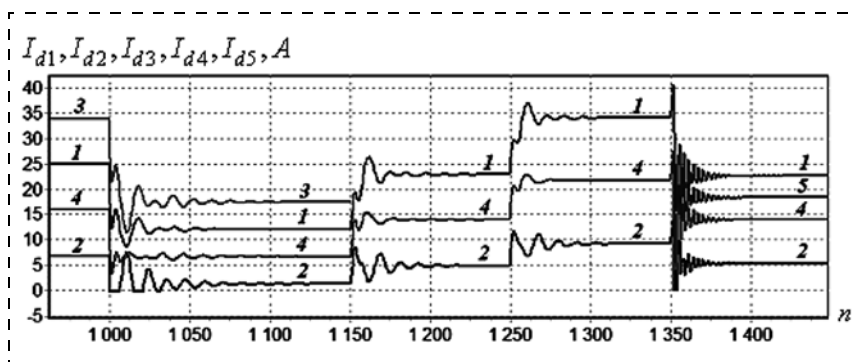


Рис. 5. Результаты моделирования группового преобразователя с переменным модульным составом (1–5 — огибающие потребляемых инверторами токов, n — номер периода выходной частоты)

Основные результаты

1. Разработаны математические модели группового преобразовательного комплекса с гибкой модульной структурой для питания нагрузки, изменяющейся в широких пределах.

2. Представлены алгоритмы управления структурой преобразователя в функции нагрузки, обеспечивающие энергетическую эффективность как в режимах номинальной нагрузки, так и в режимах, близких к холостому ходу. Предложены алгоритмы определения оптимальной последова-

тельности переключений модулей по критериям качества переходных процессов.

3. Приведены результаты исследования переходных процессов преобразователя при изменении его структуры.

Список литературы

1. **Томашевский Ю. Б., Митяшин Н. П.** Системный анализ адаптивных электротехнических комплексов. Саратов: СГТУ, 2006. 132 с.
2. **Астапович Ю. М., Миргородская Е. Е., Митяшин Н. П., Максимова Н. Н.** Динамическая модель системы распределения мощности между компенсированными инверторами тока // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. URL:

<http://www.science-education.ru/113-10837> (дата обращения 05.02.2015).

3. **Астапович Ю. М., Миргородская Е. Е., Митяшин Н. П.** Гибкая система управления объединенными по выходу преобразовательными агрегатами // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2013. № 2 (70). Вып. 1. С. 147—150.
4. **Кантер И. И., Томашевский Ю. Б., Голембиовский Ю. Б.** Система централизованного электроснабжения на базе параллельно работающих преобразователей частоты // Электричество. 1991. № 1. С. 39—47.
5. **Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта** / Под ред. Д. А. Поспелова. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 321 с.
6. **Бесекерский В. А., Попов Е. П.** Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1966. 992 с.

Control of the Structure of a Flexible Power Supply System

Yu. M. Astapovich, N. P. Mityashin, mityashinnp@mail.ru, **Yu. B. Tomashevsky**, yurytomash@mail.ru, **E. E. Mirgorodskaya**, mee85@inbox.ru, **A. V. Denisov**, denisov alex.v@mail.ru, Saratov State Technical University named after Yu. A. Gagarin, Saratov, 410054, Russian Federation

Received on February 05, 2015

The article is dedicated to the group of converters with variable modular structure, the use of which eliminates inefficient operation of a converter at a minimal load and ensures the necessary power reserve under a load close to the maximal. Inefficiency of the group converters of a permanent structure may occur at a minimum load, in particular if the modules are used as stand-alone inverters with an excess reactive power compensator, which in this mode distorts considerably the quality of the output voltage curve. For this reason, in case the power supply is organized by a group of inverters and the total power of the modules is much larger than the current load power, it is advisable to change the module structure, depending on the load. The algorithm of an automatic determination of the optimal structure of the modules is presented. It is realized due to switching of the converter modules in real time. The structural optimization is implemented automatically according to two criteria: the degree of compliance of the modular structure of a converter with the necessary power reserve and the degree of compliance with the power limits. Algorithms were developed for determination of the optimal sequence of the switching modules according to the additive criteria (time transients, total power of modules, involved in switching). The mathematical models are based on the elements of the theory of fuzzy sets and optimization on graphs. The effectiveness of the algorithms was tested using the developed computer model for the system with a variable structure for a five module converter.

Keywords: group converting complex, module, structure, optimization, criteria, control, flexibility, efficiency, modeling

For citation:

Astapovich Yu. M., Mityashin N. P., Tomashevsky Yu. B., Mirgorodskaya E. E., Denisov A. V. Control of the Structure of a Flexible Power Supply System, *Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 5, pp. 337—343.

DOI: 10.17587/mau.16.337-343

References

1. **Tomashevsky Yu. B., Mityashin N. P.** *Sistemnyi analiz adaptivnykh elektrotekhnicheskikh kompleksov* (System analysis of adaptive electrotechnical complexes), Saratov, Publishing house of SGTU, 2006, 132 p. (in Russian).
2. **Astapovich Yu. M., Mirgorodskaya E. E., Mityashin N. P., Maksimova N. N.** *Dinamicheskaya model' sistemy raspredeleniya moshchnosti mezhdu kompensirovannymi invertorami toka* (Dynamic model of system of distribution of power between the compensated inverters of current), *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya*, 2013, no. 6. URL: <http://www.science-education.ru/113-10837> (date of access 05.02.2015) (in Russian).

3. **Astapovich Yu. M., Mirgorodskaya E. E., Mityashin N. P.** *Gibkaya sistema upravleniya ob'edinennymi po vykhodu preobrazovatel'nymi agregatami* (Flexible control system of the conversion units united in output), *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, no. 2 (70), vol. 1, pp. 147—150 (in Russian).

4. **Kanter I. I., Tomashevsky Yu. B., Golembiovsky Yu. B.** *Sistema tsentralizovannogo elektrosnabzheniya na baze parallel'no rabotayushchikh preobrazovatelei chastoty* (System of the centralized power supply on the base of parallel working converters of frequency), *Elektrichestvo*, 1991, no. 1, pp. 39—47 (in Russian).

5. **Pospelov D. A.** ed. *Nechetkie mnozhestva v modelyakh upravleniya i iskusstvennogo intellekta* (Indistinct sets in models of control and artificial intelligence), Moscow, Nauka, 1986, 321 p. (in Russian).

6. **Besekersky V. A., Popov E. P.** *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* (Theory of systems of automatic control), Moscow, Nauka, 1966, 992 p. (in Russian).

Corresponding author:

Mirgorodskaya Ekaterina E., Ph. D., Associate Professor, Saratov State Technical University named after Yu. A. Gagarin, Saratov, 410054, Russian Federation, e-mail: mee85@inbox.ru