

УДК 621.314.263

УПРАВЛЕНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИМ ИНДУКТИВНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

М. В. Пронин,

доктор техн. наук, профессор

А. Г. Воронцов,

канд. техн. наук, старший преподаватель

ОАО «Силовые машины», г. Санкт-Петербург

А. Ю. Хон,

начальник группы

НИИ электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, г. Санкт-Петербург

Предложена схема и алгоритм управления накопителем энергии со сверхпроводящими индуктивными катушками. В накопителе использован многотактный активный выпрямитель и широтно-импульсные преобразователи. Предложено векторное управление, которое обеспечивает регулирование активной и реактивной мощностей сети переменного напряжения, а также напряжения нагрузки.

Ключевые слова — сверхпроводящий накопитель энергии, активный выпрямитель, векторное управление, математическая модель, компьютерная модель.

Введение

Существуют различные способы накопления энергии: в виде потенциальной энергии воды в гидроаккумулирующих электростанциях, в виде кинетической энергии маховиков, в виде электроэнергии аккумуляторов и конденсаторов, в виде тепловой энергии. В зависимости от способа накопления и количества энергии может использоваться с различными назначениями: для оптимизации режимов работы электростанций, для электродвижения судов, кораблей, электромобилей и другого транспорта, для аварийного и импульсного питания электропотребителей, для электроинструмента.

Для большинства типов накопителей энергии требуется более или менее сложная силовая аппаратура управления, а также устройства регулирования процессов накопления и расходования энергии. В некоторых системах аппаратура управления проста и имеет второстепенное значение, в других — сложна, наукоемка, а стоимость ее составляет значительную часть стоимости всего изделия.

В данной статье рассматривается сверхпроводящий индуктивный накопитель энергии (СПИН), в котором энергия запасается в магнитном поле, а для регулирования процессов накопления и рас-

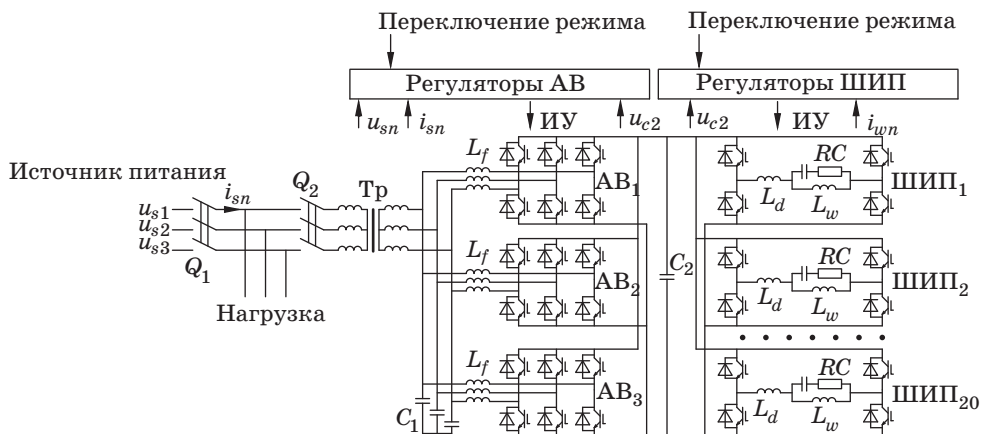
ходования энергии используется транзисторный преобразователь, содержащий активный выпрямитель и широтно-импульсные преобразователи. Предполагается применение СПИН в качестве аварийного источника питания. Предложены структура аппаратуры управления и алгоритмы регулирования электромагнитных процессов.

Силовая схема СПИН

Аппаратура управления СПИН разрабатывается при условии, что созданы сверхпроводящие индуктивные катушки с максимальным током 100 А и индуктивностью 10 Гн. Энергия катушки при указанном токе определяется известным выражением $W_w = 0,5 \cdot L_w i_w^2 = 0,5 \cdot 10 \cdot 100^2 = 50$ кДж. При минимальном токе катушки 50 А минимальная энергия равна 12,5 кДж. При этом накапливаемая и расходуемая энергия одной катушки равна 37,5 кДж.

Если мощность СПИН равна 70 кВт в течение 10 с, или 700 кВт в течение 1 с, то с учетом КПД преобразовательного оборудования требуется 20 сверхпроводящих индуктивных катушек. Предлагаемая схема такого аварийного (импульсного) источника питания изображена на рис. 1.

Основные элементы СПИН: трансформатор Tr ; индуктивно-емкостной фильтр с емкостями C_1



■ Рис. 1. Схема СПИН с аппаратурой управления: ИУ — импульсы управления

и индуктивностями L_f ; активный выпрямитель АВ с транзисторными мостами АВ₁–АВ₃; емкостной фильтр постоянного напряжения C_2 ; широтно-импульсные преобразователи напряжения ШИП₁–ШИП₂₀; LCR-фильтры напряжений нагрузки с индуктивностями L_d и RC-цепями; сверхпроводящие индуктивности L_w ; системы управления АВ и ШИП. Источником питания СПИН является электросеть 380 В, 50 Гц, мощностью не менее 50 кВ·А.

В режиме накопления энергии в СПИН ток в каждой катушке увеличивается до 100 А. При поддержании энергии СПИН токи в сверхпроводящих индуктивностях стабилизируются на уровне $(100 \pm 0,5)$ А.

В режиме аварийного источника питания энергия СПИН выдает в трехфазную нагрузку с напряжением 380 В и частотой 50 Гц. Мощность нагрузки и длительность ее питания соответствуют накопленной энергии. Например, возможна выдача мощности 100 кВ·А (70 кВт) в течение 10 с, или мощности 1000 кВ·А (700 кВт) в течение 1 с. В процессе питания трехфазной нагрузки допускается снижение тока в сверхпроводящих индуктивностях от 100 до 50 А, что соответствует использованию 75 % энергии, накопленной в электромагнитном поле до начала этого режима.

Поскольку мощность 1000 кВ·А обеспечивается только в течение 1 с, мощность трансформатора равна 100 кВ·А, т. е. он работает с многократной перегрузкой. Транзисторные мосты АВ₁–АВ₃ работают в многотактном режиме — пилообразные опорные напряжения мостов взаимно сдвинуты по фазе на угол, равный отношению 360 эл. град к количеству мостов. Это облегчает фильтрацию напряжений и токов сети и позволяет снизить токовую нагрузку конденсаторов на входе и выходе АВ. LCR-фильтры в цепях сверхпроводящих индуктивностей L_w используются для уменьшения размаха пульсаций напряжения.

Алгоритмы управления СПИН

Для управления СПИН используются два алгоритма. Переключения системы управления из одного режима в другой осуществляются по сигналу, который формируется в результате анализа напряжения сети.

В режимах накопления и поддержания энергии СПИН (режим 1) АВ стабилизирует выпрямленное напряжение, обеспечивает синусоидальность токов сети 380 В, 50 Гц и коэффициент мощности, близкий к 1. В каждом ШИП регулятор стабилизирует ток сверхпроводящей катушки на уровне $(100 \pm 0,5)$ А.

В режиме аварийного источника (режим 2) выпрямленное напряжение стабилизируется регуляторами ШИП при снижении токов катушек. АВ стабилизирует напряжение и частоту сети 380 Гц, 50 Гц и обеспечивает синусоидальность токов. Коэффициент мощности сети в этом режиме определяется нагрузкой.

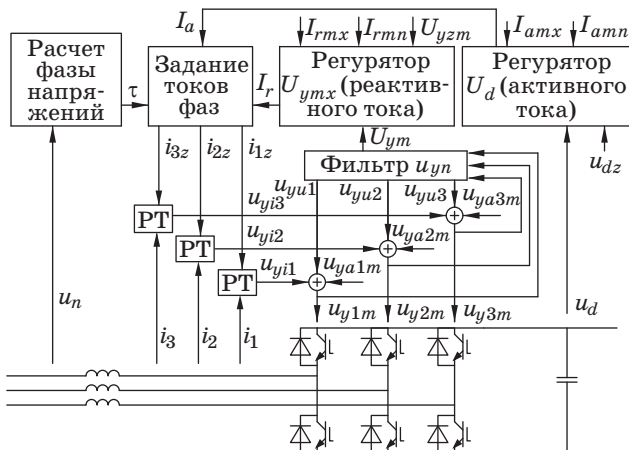
Наиболее сложным элементом СПИН является АВ. Особенности АВ в различных вариантах применения и алгоритмы управления рассмотрены в технической литературе [1–12]. В данном случае для режима 1 структура системы управления АВ представлена на рис. 2.

Синхронизация АВ с сетью осуществляется по фазе τ напряжений сети:

$$\left. \begin{aligned} u_x &= (u_3 - u_2) / \sqrt{3}, U_m = \sqrt{u_x^2 + u_1^2}, \\ \text{если } u_x > 0, & \text{ то } \tau = \arcsin(u_1 / U_m), \\ \text{иначе } \tau &= \pi - \arcsin(u_1 / U_m), \end{aligned} \right\}$$

где u_1, u_2, u_3 — напряжения фаз энергосистемы.

При стабилизации напряжения на выходе АВ на входы регулятора поступают сигналы по заданному u_{dz} и фактическому u_d выпрямленному напряжению.



■ Рис. 2. Система управления АВ в режиме накопления энергии в СПИН: РТ — регулятор тока

На выходе формируется амплитуда активных составляющих токов фаз I_a :

$$\left. \begin{aligned} I_a &= K_{ao}(u_{dz} - u_d) + I_{ai}, \\ \text{если } I_a > I_{amx}, & \text{ то } I_a = I_{amx}, \\ \text{если } I_a < I_{amn}, & \text{ то } I_a = I_{amn}, \\ \text{иначе } I_{ai} &= K_{ai} \int (u_{dz} - u_d) dt, \end{aligned} \right\}$$

где t — время; K_{ai} , K_{ao} — коэффициенты регулятора; I_{amx} , I_{amn} — ограничения амплитуды активных токов «сверху» и «снизу».

При колебаниях напряжения питания возможен переход АВ в режим перемодуляции, при котором ограничиваются возможности управления. Чтобы это не произошло, предусмотрен регулятор амплитуды напряжений управления. На его входы поступают сигналы по заданной амплитуде напряжений U_{yzm} и фактической амплитуде U_{ym} . На выходе формируется амплитуда заданных реактивных составляющих токов I_r :

$$\left. \begin{aligned} I_r &= K_{ro}(U_{yzm} - U_{ym}) + I_{ri}, \\ \text{если } I_r > I_{rmx}, & \text{ то } I_r = I_{rmx}, \\ \text{если } I_r < I_{rmn}, & \text{ то } I_r = I_{rmn}, \\ \text{иначе } I_{ri} &= K_{ri} \int (U_{yzm} - U_{ym}) dt, \end{aligned} \right\}$$

где K_{ri} , K_{ro} — коэффициенты регулятора; I_{rmx} , I_{rmn} — ограничения амплитуды реактивных токов «сверху» и «снизу».

Если амплитуда заданной реактивной составляющей тока сети равна 0, то АВ работает с коэффициентом мощности, близким к 1.

В блоке определения фазы напряжений сети вычисляется фаза τ . Это позволяет суммировать активные и реактивные составляющие токов и вычислить заданные токи фаз мостов:

$$\left. \begin{aligned} i_{1z} &= I_a \sin(\tau) + I_r \cos(\tau); \\ i_{2z} &= I_a \sin(\tau - 2\pi/3) + I_r \cos(\tau - 2\pi/3); \\ i_{3z} &= I_a \sin(\tau - 4\pi/3) + I_r \cos(\tau - 4\pi/3). \end{aligned} \right\}$$

Токи фаз каждого моста искажены высшими гармониками и составляющими нулевой последовательности. Чтобы ослабить влияние пульсаций токов на электромагнитные процессы и устранить влияние составляющих нулевой последовательности, регулирование осуществляется по суммарным токам фаз АВ:

$$i_n = \sum_{m=1}^M i_{vnm}.$$

В каждой фазе каждого моста АВ ток регулируется пропорциональным регулятором. На их входы поступают сигналы по заданному i_{nz} и фактическому i_n токам. На выходах формируются сигналы по «токовым» составляющим напряжений управления:

$$u_{yin} = K_{io}(i_{nz} - i_n).$$

В фазах мостов для выравнивания токов и подавления составляющих нулевой последовательности используются еще пропорциональные регуляторы, на входы которых поступают сигналы по заданному току i_{nz}/M (M — количество мостов) и по фактическому току i_{vnm} . На выходах формируются сигналы по «уровнительным» составляющим напряжений управления:

$$u_{yanm} = K_{ao}(i_{nz} / M - i_{vnm}).$$

Напряжения управления мостов u_{ynm} формируются в виде сумм «токовых» u_{yin} , «сетевых» u_{yun} и «уровнительных» u_{yanm} составляющих:

$$u_{ynm} = u_{yin} + u_{yun} + u_{yanm}.$$

Составляющие u_{yun} выделяются из усредненных напряжений управления:

$$u_{yn} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M u_{ynm}.$$

Для определения составляющих u_{yun} проводится фильтрация напряжений управления u_{yn} , как описано в работах [2, 3]. При этом на выходе фильтра выделяются амплитуда U_{ym} и фаза τ_u основных составляющих напряжений управления. Это позволяет определить мгновенные значения основных составляющих напряжений управления:

$$u_{yun} = U_{ym} \sin[\tau_u - 2\pi(n-1)/3].$$

Описанный алгоритм управления АВ использован при построении математической и компьютерной моделей СПИН в целом.

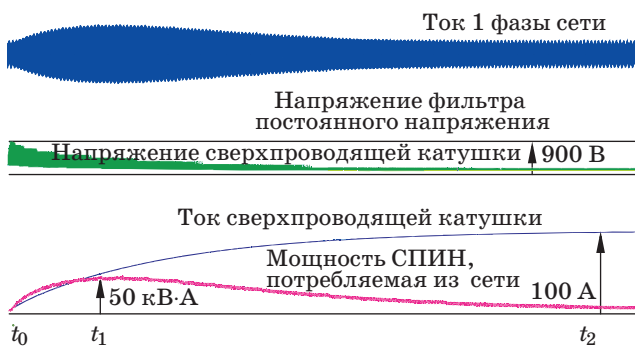
Результаты расчетов режимов работы СПИН

Компьютерные модели СПИН построены по методологии моделирования систем по взаимосвязанным подсистемам [2, 3]. Методология позволяет создавать модели, работающие с минимальными затратами машинного времени [9]. Программы расчетов на ЭВМ разработаны на языке программирования C++ и встроены в графическую оболочку, которая позволяет отображать информацию на экране дисплея, вводить в ЭВМ исходные данные для расчетов, анализировать результаты расчетов, представлять результаты в виде графиков и таблиц.

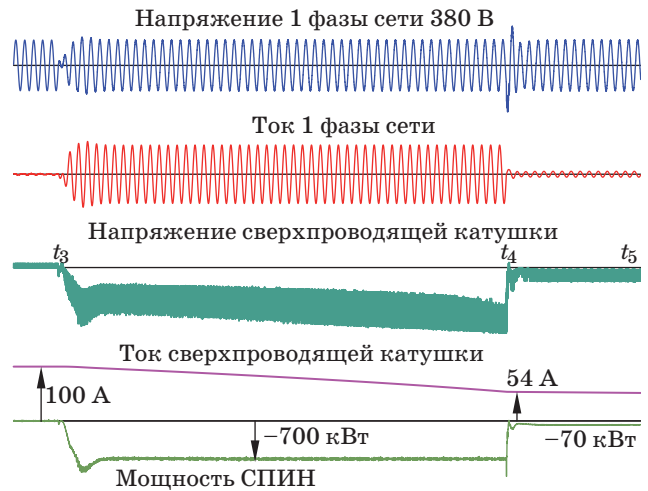
По разработанным программам выполнена серия расчетов режимов работы СПИН. Один расчет выполнен для режима включения СПИН и накопления энергии в сверхпроводящих катушках. При расчете использованы указанные выше параметры СПИН. Токи в индуктивностях изменялись от 0 до 100 А. Частота широтно-импульсной модуляции в АВ и ШИП принята равной 8000 Гц.

Результат расчета процесса накопления энергии в сверхпроводящих катушках представлен на рис. 3. На рисунке изображены: ток 1 фазы питающей электросети; выпрямленное напряжение АВ; напряжение 1 сверхпроводящей катушки; ток 1 сверхпроводящей катушки; мощность, потребляемая из питающей сети в процессе накопления энергии (коэффициент мощности равен 1).

В момент времени t_0 СПИН подключается к сети 380 В, 50 Гц и переходит в режим «зарядки» сверхпроводящих катушек. До момента t_1 СПИН передает энергию сети в катушки при снижении их напряжения. В момент t_1 достигается максимальная мощность СПИН 50 кВ·А и далее до момента t_2 мощность снижается. В момент t_2 ток сверхпроводящих катушек достигает 100 А, зарядка катушек прекращается, мощность СПИН уменьшается до мощности потерь.



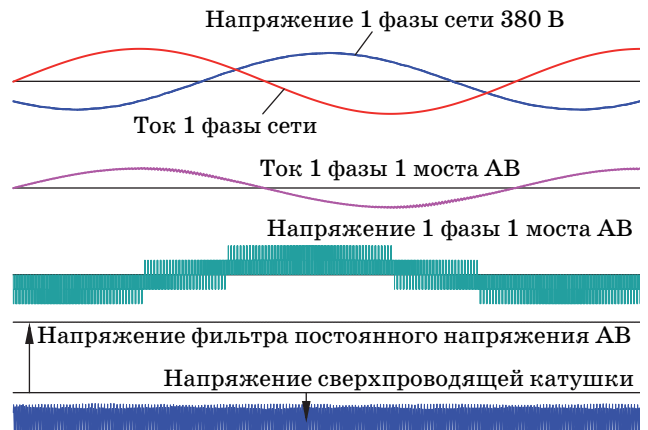
■ Рис. 3. Режим накопления энергии в СПИН



■ Рис. 4. Напряжения и токи СПИН при питании сети 380 В (мощность 700 кВт)

Переход СПИН из режима поддержания энергии катушек в режим питания нагрузок сети 380 В, 50 Гц происходит автоматически при исчезновении напряжения сети. При этом СПИН поддерживает заданное напряжение сети 380 В и генерирует ту мощность, которая требуется нагрузке. Этот процесс отображен на рис. 4. На рисунке изображены: напряжение фазы сети, ток фазы сети, напряжение 1 сверхпроводящей катушки, ток 1 катушки, мощность СПИН.

В соответствии с рис. 4 в момент времени t_3 отключается питающая сеть и СПИН из «ждущего» режима переходит в «активный» режим работы, т. е. питает нагрузку сети 380 В, 50 Гц мощностью 700 кВт (1000 кВ·А). При этом изменяется знак напряжений на сверхпроводящих катушках и токи катушек начинают уменьшаться. В этом режиме СПИН работает 1 с. Как видно из диаграммы, в процессе разрядки сверхпроводя-



■ Рис. 5. Напряжения и токи СПИН при питании сети 380 В — фрагмент (мощность 700 кВт)

щих катушек в течение 1 с их токи уменьшаются от 100 А до 54 А. В момент времени t_4 мощность нагрузки сети 380 В уменьшается до 70 кВт (100 кВ·А) и дальнейшая работа продолжается при этой мощности до момента, при котором ток катушек станет меньше 50 А.

Фрагмент процесса работы СПИН с мощностью 700 кВт представлен на рис. 5, где изображены: напряжение и ток фазы сети, ток и напряжение 1 фазы 1 моста АВ, выпрямленные напряжения АВ и 1 сверхпроводящей катушки. На рисунке видно, что ток и напряжение сети 380 В, 50 Гц в этом режиме практически синусоидальны.

Очевидно, что в рассматриваемой системе обеспечивается переход СПИН в режим работы при нагрузке 70 кВт (100 кВ·А) сети 380 В, 50 Гц. Запас энергии сверхпроводящих катушек обеспечивает работу в этом режиме в течение 10 с.

Заключение

В статье предложена структура накопителя энергии (аварийного источника питания), содержащего сверхпроводящие катушки индуктивно-стей и транзисторный преобразователь с активным выпрямителем и широтно-импульсными преобразователями постоянного напряжения.

Предложен алгоритм векторного управления накопителем энергии, в соответствии с которым разделяются системы управления активным выпрямителем и широтно-импульсными преобразователями и осуществляется раздельное регулирование активной и реактивной мощности выпрямителя.

Работа выполнялась в ФГУП «НИИ ЭФА». Преобразовательное оборудование разрабатывалось в ООО «Лаборатория преобразовательной техники» при участии специалистов ГУАП.

Литература

1. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / ОАО «Электросила». — СПб., 2003. — 172 с.
2. Пронин М. В., Воронцов А. Г., Калачиков П. Н., Емельянов А. П. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение) / ОАО «Силовые машины» «Электросила». — СПб., 2004. — 252 с.
3. Пронин М. В. Электромеханотронные системы. Создание на основе комплекса уточненных быстродействующих моделей. — LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. — 224 с.
4. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Активная фильтрация напряжений и токов сети в установках с высоковольтными тиристорными преобразователями // Горное оборудование и электромеханика. 2005. № 5. С. 41–45.
5. Пронин М. В. Моделирование и анализ системы с многофазным асинхронным генератором и многофазным активным выпрямителем // Электротехника. 2006. № 5. С. 55–61.
6. Пронин М. Активные фильтры высших гармоник. Направления развития // Новости электротехники. 2006. № 2(38). <http://www.news.elteh.ru/> (дата обращения: 16.05.2012).
7. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Система с многофазным асинхронным генератором и несколькими активными преобразователями // Электротехника. 2007. № 10. С. 41–45.
8. Пронин М. В., Воронцов А. Г., Терещенков В. В. Управление многотактным активным выпрямителем экскаватора ЭКГ-35К // Горное оборудование и электромеханика. 2009. № 10. С. 29–33.
9. Кузин М. Е., Нахди Т., Кистанова Е. В., Пронин М. В., Воронцов А. Г. Особенности моделирования электрических систем в SIMULINK и методами их расчета по взаимосвязанным подсистемам // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. № 7. С. 88–95.
10. Pronin M., Shonin O., Vorontsov A., Gogolev G. Control system of the multistage active rectifier energizing power shovel multi-motor variable-frequency drive for mining applications // EPE-2011, Aug. 30 — Sept. 01, 2011, Birmingham, UK. <http://www.epe2011.com/> (дата обращения: 01.09.2011).
11. Pronin M., Shonin O., Vorontsov A., Gogolev G. A Pumped Storage Power Plant with Double-Fed Induction Machine and Cascaded Frequency Converter // EPE-2011, Aug. 30 — Sept. 01, 2011, Birmingham, UK. <http://www.epe2011.com/> (дата обращения: 01.09.2011).
12. Pronin M., Shonin O., Vorontsov A., Gogolev G., Nahdi T. A Double-Fed Induction Machine with a Multistage-Multilevel Frequency Converter for Pumped Storage Power Plant Applications // PEAM 2011, Sept. 08 — Sept. 09, 2011, Wuhan, China. <http://www.peamconf.org/2011/> (дата обращения: 09.09.2011).