

УДК 621.314.263

А. Г. Воронцов ООО «НПЦ СЭС» СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

М. В. Пронин Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

В. В. Глушаков, Н. И. Федоров АО «Силовые машины»

Моделирование ЭЭС с продольным СТАТКОМом методами взаимосвязанных подсхем для анализа режимов распределения нагрузок двух ЛЭП

При распределении нагрузок между различными источниками электроэнергии и ЛЭП возможно применение продольных СТАТКОМов. Для расчета и анализа распределения активных и реактивных мощностей в электрооборудовании электроэнергетических систем построены математическая и компьютерная модели. Моделирование выполнено по методологии расчета систем по взаимосвязанным подсистемам, обеспечивающей минимальные затраты машинного времени. Разработана одна из возможных структур системы управления. Приведены результаты расчета электромагнитных процессов в конкретной электроэнергетической системе с напряжением 10.5 кВ. Показано, что СТАТКОМ позволяет реализовать только одну функцию регулирования, например обеспечивать заданное распределение реактивной мощности между двумя ЛЭП. Другие функции стабилизации заданного режима работы системы должны обеспечиваться другими устройствами, например стабилизация напряжения нагрузки и распределение активной мощности двух ЛЭП – источниками электроэнергии.

Продольный СТАТКОМ, электроэнергетическая система, высоковольтные линии электропередач, моделирование, распределение нагрузок, статические продольные компенсаторы

Заводы, рудники и многие другие объекты по надежности электроснабжения относятся к потребителям 1-й категории [1]. В электроэнергетических системах (ЭЭС) их питание осуществляется от взаимно независимых источников. Если потребители удалены от источников энергии, то их питание выполняется через линии электропередач (ЛЭП). В зависимости от особенностей ЭЭС в оборудовании возникают более или менее серьезные падения напряжения, изменяются значения и фазы напряжений на концах ЛЭП. Если при переводе нагрузки с одного источника на другой перерыв питания потребителя не допускается, то необходима параллельная работа различных ЛЭП, а также согласование их напряжений, распределение между ЛЭП мощности, передаваемой в нагрузку. Синхронизация напряжений ЛЭП с помощью СТАТКОМа рассмотрена на основе компьютерного моделирования ЭЭС в предыдущей публикации авторов [2]. В данной статье речь идет об обеспечении совместной работы двух ЛЭП при распределении мощности между ними с помощью продольного СТАТКОМа.

Задача решается на компьютерных моделях, построенных по методологии расчета систем по взаимосвязанным подсистемам [2], [3]. При этом используются результаты моделирования, полученные ранее [4]. Анализ выполнен на сравнительно маломощной ЭЭС с напряжением 10.5 кВ. Результаты исследования могут быть распространены и на более мощные системы.

Схема ЭЭС с двумя ЛЭП и продольным СТАТКОМом. Для исследования электромагнитных процессов в ЭЭС, содержащей источники электроэнергии, ЛЭП, продольный СТАТКОМ, трехфазную нагрузку и управляющие устройства, используется компьютерная модель, построенная по схеме рис. 1. В схеме изображены два трехфазных источника напряжения ограниченной мощности. Источник 1 содержит трехфазную систему синусоидальных ЭДС e_{sn} (n = 1, 2, 3,амплитуда ЭДС фаз emx) и индуктивности в фазах L_s. Нулевая точка трехфазной обмотки связана с «землей» через емкость C₀. Участок «земли» представлен активным сопротивлением R₀. Фактическое значение напряжения фаз u_{sn} поступает на регулятор напряжения 1-го источника. Источник 2 содержит трехфазную систему синусоидальных ЭДС e_{an}, а также индуктивности и активные сопротивления в фазах L_a и R_a соответственно.

От источника 1 энергия передается в нагрузку через ЛЭП₁, которая разбита на M последовательно соединенных фрагментов. Схема фрагмента представлена на рис. 1. Каждый фрагмент ЛЭП₁ содержит активное сопротивление R_l и индуктивность L_l фазы, а также сопротивление участка «земли» R_0 , ЭДС в фазах e_{nm} (n = 1, 2, 3; m = 1, 2, ..., M), «паразитные» емкости фаз относительно «земли» C_0 . С помощью ЭДС e_{nm} учитываются взаимные индуктивности фаз (различие индуктивностей фаз для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей). Напряжения и токи фаз на выходе фрагмента ЛЭП u_{nm} и i_{nm} соответственно, на выходе ЛЭП – u_{nM} и i_{nM} . СТАТКОМ создает в фазах добавки напряжений Δu_n . С учетом этих добавок напряжения фаз на клеммах выключателя K_1 равны $u_{\Delta n}$.

От источника 2 энергия должна передаваться в нагрузку через ЛЭП₂, которая учтена индуктивностями фаз L_b и активными сопротивлениями R_b . Напряжения фаз на концах ЛЭП₂ (на входе выключателя K_2) равны u_{kn} (n = 1, 2, 3). Фактическое значение напряжения фаз u_{an} поступает на регулятор 2-го источника.

Продольный СТАТКОМ представлен в схеме на рис. 1 трехфазным трансформатором Тр с разделенными фазами вторичной обмотки и модульным многоуровневым транзисторным преобразователем. В ряде случаев трансформатор может быть заменен реакторами, что определяется параметрами ЭЭС, структурой СТАТКОМа и его элементной базой.

Нагрузка в схеме рис. 1 представлена индуктивностями L_L и активными сопротивлениями R_L , напряжения фаз нагрузки – u_{Ln} . Нагрузка подключается к источнику 1 и ЛЭП₁ выключателем K_1 , к источнику 2 и ЛЭП₂ – выключателем K_2 . На вход регулятора СТАТКОМА поступают значения активной мощности P_1 и P_2 на ЛЭП₁ и ЛЭП₂ соответственно. В модели предусмотрены скачкообразные изменения мощности нагрузки и, соответ-



ственно, ее сопротивлений. При ограниченной мощности источников энергии возникает необходимость питания нагрузки по двум ЛЭП при распределении мощности между ними с помощью СТАТКОМа.

Варианты решения задачи синхронизации напряжений ЛЭП₁ $(u_{\Delta n})$ и ЛЭП₂ (u_{kn}) рассмотрены в [2]. В данной статье используются указанные технические решения и рассматривается распределение мощности между двумя ЛЭП, питающими общую нагрузку при соответствующем управлении продольным СТАТКОМом.

Модель ЭЭС с двумя ЛЭП и продольным СТАТКОМом. Моделирование ЭЭС на рис. 1 осуществляется по схеме силовой части ЭЭС рис. 2, в которой СТАТКОМ представлен трехфазной системой регулируемых источников напряжения Δ_{un} и индуктивностями рассеяния трансформаторов L_t . Модель предназначена для оценки параметров СТАТКОМа в зависимости от характеристик источников энергии и ЛЭП, а также для оценки его возможностей распределения нагрузки между ЛЭП.

Предполагается, что в начале работы ЭЭС ключ K_1 замкнут, ключ K_2 разомкнут. При питании нагрузки от источника 1 в системе управления (СУ) ЭЭС формируется команда на перевод части нагрузки с ЛЭП₁ на ЛЭП₂. По этой команде напряжения на входах выключателей K_1 и K_2 синхронизируются СТАТКОМом и источником 1 по фазам и действующим значениям. Далее включается аппарат K_2 и обе ЛЭП работают на общую нагрузку. При этом СУ источника 2 обеспечивает передачу в нагрузки стабилизируется и она потребляет фиксированную мощность, то соответственно увеличению мощности ЛЭП₂ уменьшается мощность ЛЭП₁.

Математическое описание ЭЭС осуществляется при разделении силовой схемы на подсхемы, связанные друг с другом зависимыми элементами (зависимыми источниками напряжения и тока). При этом выполняется ряд преобразований силовой схемы ЭЭС.

Одно из преобразований схемы заключается в замене источника 2 и ЛЭП₂ трехфазной системой зависимых источников напряжения u_{kn} (как указано на рис. 2)

$$u_{kn} = e_{an} - L_{\Sigma} \frac{di_{kn}}{dt} - R_{\Sigma} i_{kn},$$

где i_{kn} – токи фаз источника 2; $L_{\Sigma} = L_a + L_b$; $R_{\Sigma} = R_a + R_b$.

Переход к расчету процессов в ЭЭС по схеме рис. 2 происходит после синхронизации напряжений двух ЛЭП и включения коммутационного аппарата K_2 (до этого момента расчет выполняется по алгоритму, описанному в [2]). Ток, протекающий в фазах источника 1, представлен i_{sn} , а напряжения и токи нагрузки – u_{Ln} и i_{Ln} .

При моделировании силовой части системы, содержащей источник 1, ЛЭП₁, СТАТКОМ и нагрузку, выполняют преобразования схемы, при которых используются токи

$$i_{c0} = -i_{s1} - i_{s2} - i_{s3}, i_{cn1} = i_{sn} - i_{n1};$$

$$i_{cnm} = i_{n(m-1)} - i_{nm};$$

$$i_{cnM} = i_{nM} - i_{n(M-1)};$$

$$i_{RL} = -i_{L1} - i_{L2} - i_{L3},$$

$$m = 1, 2, ..., M, n = 1, 2, 3.$$

Токи *i_{Rm}* в сопротивлениях нулевой последовательности



$$i_{R0} = i_{c0};$$
 $i_{R1} = i_{R0} + i_{c11} + i_{c21} + i_{c31};$

 $i_{Rm} = i_{R(m-1)} + i_{c1m} + i_{c2m} + i_{c3m}, m = 1, 2, ..., M.$

Емкости и сопротивления нулевых ветвей представляются зависимыми источниками, что позволяет преобразовать схему рис. 2 к виду рис. 3

$$u_{c0} = \frac{1}{C_0} \int i_{c0} dt;$$

$$u_{cR0} = -u_{c0} - R_0 i_{c0}, u_{Rm} = -R_0 i_{Rm};$$

$$u_{cnm} = \frac{1}{C_0} \int i_{cnm} dt; u_{cRL} = u_{cL} + R_0 i_{RL};$$

$$m = 1, 2, ..., M, n = 1, 2, 3.$$

Зависимые источники напряжения из ветвей с сопротивлениями нулевой последовательности переносятся в другие ветви схемы рис. 3. Эта операция осуществляется последовательно: сначала перенос из нулевой ветви, потом из 1-й ветви, и т. д. В результате в нулевом проводе (в «земле») источники исчезают. Затем зависимые источники нулевых ветвей складываются с зависимыми источниками, заменяющими «паразитные» емкости фаз,

$$e_{cnm} = u_{cnm} + u_{Rm}, m = 1, 2, \dots, M, n = 1, 2, 3.$$
 (1)

Кроме того, зависимые источники напряжения u_{kn} переносятся в ветви СТАТКОМа и в фазы нагрузки. При этом схема на рис. 3 преобразуется к виду рис. 4. Разности токов фаз СТАТКОМа и нагрузки представляются в виде зависимых источников тока, которые замыкают фазы $ЛЭ\Pi_2$, и схема преобразуется в семейство подсхем на рис. 4.

На рис. 4 источник 1 замкнут накоротко, каждый фрагмент ЛЭП₁ и нагрузка также замкнуты накоротко. Это позволяет отделить все фрагменты ЭЭС друг от друга и рассматривать ЭЭС как совокупность подсхем, которые взаимосвязаны зависимыми источниками напряжения и тока. Параметры этих источников в каждый момент времени определяются в результате итерационного расчета. После этого происходит переход к следующему моменту времени интегрированием токов и напряжений явным методом Эйлера при использовании производных, найденных в итерационном цикле расчета.

Производные токов фаз в подсхеме источника 1

$$\frac{di_{sn}}{dt} = \frac{1}{L_s + L_{st}} \left(e_{sn} - R_s i_{sn} - e_{cn1} + L_{st} \frac{di_{sn}}{dt} \right),$$

где L_{st} – стабилизирующая индуктивность.

При математическом описании процессов в подсхемах ЛЭП₁ (рис. 4) используются ЭДС, которые позволяют учесть взаимные индуктивности фаз

$$e_{nm} = \frac{L_l - L_{l0}}{3} \sum_{n=1}^{3} \frac{di_{nm}}{dt}$$

где L_l – индуктивность фазы фрагмента ЛЭП для токов прямой и обратной последовательностей; L_{l0} – индуктивность нулевой последовательности фрагмента ЛЭП₁.





Производные токов фаз в подсхемах фрагментов ЛЭП

$$\frac{di_{nm}}{dt} = \frac{1}{L_l + L_{st}} \times \left(e_{cnm} + e_{nm} - R_l i_{nm} - e_{cnm+1} + L_{st} \frac{di_{nm}}{dt}\right)$$

В подсхеме СТАТКОМа и нагрузки в фазах протекают токи прямой, обратной и нулевой последовательностей. Для раздельного определения составляющих токов подсхему со СТАТКОМом и нагрузкой целесообразно представить в виде нескольких взаимосвязанных подсхем, как изображено на рис. 5.

При преобразовании подсхемы СТАТКОМа зависимые источники напряжения пофазно суммируются и схема рис. 5, *а* преобразуется к виду рис. 5, *б*:

$$u_{\Sigma n} = e_{cnM} + \Delta u_n - u_{kn}$$

В схеме рис. 5, *б* определяются источники напряжения нулевой последовательности

$$e_0 = (u_{\Sigma 1} + u_{\Sigma 2} + u_{\Sigma 3})/3$$

Подсхемы рис. 5, б преобразуются к виду рис. 5, в при удалении составляющих нулевой последовательности из напряжений фаз:

$$e_{\Sigma n} = u_{\Sigma n} - e_0, \quad n = 1, 2, 3.$$

В подсхеме расчета тока нулевой последовательности рис. 5, *в* определяется ЭДС нулевой последовательности

$$u_0 = e_0 - u_{RL}.$$

В полученных трехфазных подсхемах рис. 5, e определяются производные токов и сами токи прямой и обратной последовательностей i_{pnM} и i_{pLn} , в третьей подсхеме определяются также производная тока и ток нулевой последовательности

$$\frac{di_{pnM}}{dt} = \frac{1}{L_t} e_{\Sigma n}, \frac{di_{pLn}}{dt} = \frac{1}{L_L} u_{kn}, n = 1, 2, 3,$$

$$\frac{di_{0L}}{dt} = \frac{1}{3(L_t + L_L)} \left(u_0 - \frac{R_L}{3} i_{0L} \right).$$
(2)

После определения составляющих токов в уравнениях (2) определяются фактические токи в подсхемах рис. 5, *в*

$$i_{nM} = i_{pnM} + i_{0L}/3, \ i_{Ln} = i_{pLn} + i_{0L}/3,$$

 $i_{RL} = -i_{0L}, \ n = 1, 2, 3.$

Далее (см. рис. 4) находятся производные токов и токи источника 2

$$\frac{di_{kn}}{dt} = \frac{di_{pnM}}{dt} - \frac{di_{pLn}}{dt}, i_{kn} = i_{pnM} - i_{pLn}, n = 1, 2, 3.$$

При использовании токов источника 2 и их производных рассчитываются напряжения ЛЭП₂ по (1) и итерационный цикл расчета замыкается. В итерационном цикле определяются производные токов и напряжения зависимых источников. Интегрирование токов выносится за пределы итерационного цикла расчета – в цикл расчета переменных по времени [2].

Регулирование ЭЭС при распределении мощностей между двумя ЛЭП. Если при питании нагрузки от источника 1 разность фаз векторов напряжений ЛЭП₁ и ЛЭП₂ регулировалась СТАТКОМом, а разность напряжений двух ЛЭП – источником 1, то после включения устройства K_2 разности входных параметров указанных регуляторов принимают нулевые значения и система регулирования перестраивается.

В режиме распределения активной и реактивной нагрузок между двумя ЛЭП регулятор источника 1, воздействуя на амплитуду ЭДС e_{sn} , стабилизирует напряжение нагрузки U_L на заданном уровне U_{Lz} . Регулятор источника 2, воздействуя на амплитуду ЭДС e_{an} , устанавливает заданный уровень активной мощности ЛЭП₂ P_{2z} . При стабилизированном напряжении нагрузки ее активная мощность P_z остается неизменной, а активная мощность ЛЭП₁ изменяется соответственно изменению активной мощности ЛЭП₂ $P_{1z} = P_z - P_{2z}$. Распределение реактивной мощности между двумя ЛЭП регулируется СТАТКОМом. В частности, задается реактивная мощность, например $ЛЭ\Pi_2 - Q_{2z}$. Вычисляется фактическая реактивная мощность $ЛЭ\Pi_2 - Q_2$. Регулятор СТАТКОМа, воздействуя на его ЭДС, устанавливает в $ЛЭ\Pi_2$ заданную реактивную мощность. При неизменном напряжении нагрузки и неизменной ее реактивной мощности Q_z формируется также реактивная мощность $ЛЭ\Pi_1 - Q_{1z} = Q_z - Q_{2z}$.

Компьютерная модель ЭЭС с двумя источниками ЛЭП, СТАТКОМом и нагрузкой. На основе представленного математического описания ЭЭС разработана компьютерная модель Mains1and2_StCom_Load на языке C++ для расчетов на ЭВМ в среде Visual Studio (версия 13) с использованием программы ComSim1_5 [5]. В модели представленные ранее уравнения, а также описание систем управления сведены в единый алгоритм итерационного расчета электромагнитных процессов в ЭЭС [2]. Предусмотрен вывод графической информации, возможности гармонического анализа кривых и др.

Расчеты процессов при совместной работе двух ЛЭП на общую нагрузку. Режимы работы ЭЭС при подключении ЛЭП₁ и нагрузки к источнику 1 электроэнергии, а также синхронизации напряжений на входах выключателей K_1 и K_2 с помощью СТАТКОМа рассмотрены в [4]. В настоящей статье рассматриваются электромагнитные процессы в ЭЭС при подключении к нагрузке источника 2 и ЛЭП₂, а также решение задачи распределения активных и реактивных мощностей между ЛЭП₁ и ЛЭП₂ с использованием СТАТКОМа.

Расчеты электромагнитных процессов в ЭЭС выполнены для установки с напряжением 10.5 кВ при частоте 50 Гц, при предельных для этого напряжения значениях других параметров - мощность нагрузки 2.1 МВт, длина ЛЭП₁ 5 км [4]. Коэффициент мощности нагрузки принят равным 0.9, ЛЭП₁ разделена на 5 участков длиной по 1 км. На каждом участке ЛЭП1 индуктивности фазы составляют 0.00127 Гн/км, активное сопротивление фазы - 0.000854 Ом/км, емкость фазы относительно «земли» - 0.009 мкФ/км, сопротивление «земли» - 0.049 Ом/км. Источник 1 содержит в фазах индуктивности 0.0029 Гн, действующие линейные ЭДС 10.5 кВ в начале процесса, далее ЭДС регулируются в процессе поддержания напряжения нагрузки. Источник 2 имеет те же напряжение и частоту, но начальная фаза вектора напряжения смещена относительно фазы источника 1 на заданный угол. Суммарные индуктивности и активные сопротивления фаз в ЛЭП2 и в ЛЭП1 одинаковы, но ЛЭП₂ не разделяется на участки.

Результат расчета процессов в ЭЭС в режимах работы нагрузки от ЛЭП₁, подключения к нагрузке также ЛЭП₂ и распределения между двумя ЛЭП активной и реактивной мощностей представлен на рис. 6.



Индуктивность стабилизации вычислительного процесса равна 0.00005 Гн; шаг интегрирования – 0.1 мкс, шаг записи информации – 10 мкс; заданное число итераций на каждом шаге расчета по времени – 25.

Длительность представленного на рис. 6 процесса – 0.3 с. От начала в течение первых двух периодов нагрузка получает питание от источника 1 через ЛЭП₁ при отключенной ЛЭП₂. При этом источник 2, работая на холостом ходу, обеспечивает номинальное напряжение на входе выключателя K_2 , источник 1 поддерживает номинальное напряжение нагрузки и, соответственно, нулевую разность действующих напряжений на входах выключателей К1 и К2, а СТАТКОМ поддерживает нулевую разность фаз векторов напряжений на входах указанных выключателей. Таким образом, при равных частотах и одинаковом чередовании фаз обеспечиваются условия синхронизации напряжений на входах выключателей. Обеспечивается также номинальная мощность нагрузки 2.1 МВт и номинальный коэффициент мощности 0.9.

Через 0.055 с от начала рассматриваемого интервала времени включается ключ К2, и далее нагрузка получает питание от двух источников через две ЛЭП. В этом режиме алгоритмы управления ЭЭС перестраиваются. Источник 1 поддерживает номинальное напряжение нагрузки (и номинальную мощность), источник 2 обеспечивает распределение активной мощности между ЛЭП (активная мощность ЛЭП₂ задана равной 0.9 МВт), СТАТКОМ обеспечивает распределение реактивной мощности между ЛЭП (реактивная мощность ЛЭП₂ задана равной 0.4 Мвар). Заданные мощности апериодически фильтруются с постоянной времени 0.05 с. Параметры ЭЭС устанавливаются в соответствии с заданиями в течение рассматриваемого интервала времени (менее 0.3 с) при сравнительно небольшом перерегулировании активной мощности нагрузки (около 5 %).

Необходимо отметить, что постоянные времени электрических контуров ЭЭС имеют большой разброс значений, что обусловлено наличием в системе малых «паразитных» емкостей и малых индуктивностей участков ЛЭП, а также наличием значительных индуктивностей нагрузки и источников электроэнергии, значительных заданных постоянных времени в системе управления. Это

позволяет отнести систему уравнений ЭЭС, описывающих электромагнитные процессы, к жестким системам [6]. При расчетах электромагнитных процессов в ЭЭС на разработанной модели, в которой для интегрирования переменных используется явный метод Эйлера, жесткость уравнений приводит к появлению в напряжениях высокочастотных пульсаций, не характерных для рассматриваемой системы. Эти пульсации не приводят к существенным изменениям основных составляющих токов, напряжений и мощностей и устраняются при использовании легких RC-фильтров напряжений источников, нагрузки и СТАТКОМа. Эти фильтры с постоянной времени 0.0005 мкс использованы в описанных ранее расчетах. Другое возможное решение указанной проблемы применение неявных методов интегрирования дифференциальных уравнений [6].

Для расчетной оценки параметров продольного СТАТКОМа и эффективности его применения разработана компьютерная модель ЭЭС, содержащей два трехфазных источника напряжения, две ЛЭП, СТАТКОМ, нагрузку и системы регулирования. В модели реализованы алгоритмы управления источниками электроэнергии и СТАТКОМом в режиме синхронизации напряжений двух ЛЭП и в режиме их одновременной работы на общую нагрузку.

Проработан алгоритм управления ЭЭС и двумя трехфазными источниками электроэнергии, двумя ЛЭП, СТАТКОМом и нагрузкой, в соответствии с которым напряжение нагрузки стабилизируется на заданном уровне источником 1, распределение активной мощности между источниками поддерживается источником 2, а распределение реактивной мощности между источниками обеспечивается СТАТКОМом.

В части автоматизации управления ЭЭС СТАТКОМ может решать одну возложенную на него задачу – или синхронизацию фаз векторов напряжений двух источников электроэнергии, или поддержание заданной реактивной мощности в ЛЭП, или поддержание напряжения в заданном узле ЭЭС, или что-либо еще. Для комплексного решения задач автоматизации управления ЭЭС необходимо также использование других устройств управления – трансформаторов с переключаемыми отпайками, фазоповоротных устройств, регуляторов напряжения источников энергии и т. п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ): CO 153-34.20.120-03. М.: ЭНАС, 2011.

2. Моделирование ЭЭС с продольным СТАТКО-Мом методами взаимосвязанных подсхем для анализа режимов синхронизации напряжений двух ЛЭП / А. Г. Воронцов, М. В. Пронин, В. В. Глушаков, Н. И. Федоров // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. № 3. С. 72–79.

3. Воронцов А. Г., Пронин М. В. Электромеханотронные комплексы и их моделирование на ЭВМ по взаимосвязанным подсистемам. СПб.: Ладога, 2020. электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями на быстродействующих сдвоенных моделях // Электротехника. 2021. № 1. С. 20–25.

4. Воронцов А. Г., Пронин М. В. Расчет систем с

5. Св. 2019661058 ComSim1_5: программа для ЭВМ / А. Г. Воронцов (RU); правообладатель А. Г. Воронцов. № 2019619973 заявл. 12.08.19; опубл. 19.08.19.

6. Демирчян К. С., Бутырин П. А. Моделирование и машинный расчет электрических цепей: учеб. пособие для электротехн. и электроэнерг. спец. вузов / М.: Высш. шк., 1988.

A. G. Vorontsov OJSC «Npcses» (Saint Petersburg)

M. V. Pronin Saint Petersburg Electrotechical University

V. V. Glushakov, N. I. Fedorov JSC «Power machines»

SIMULATION OF ELECTRIC POWER SYSTEM SSSC BY METHODS OF INTERCONNECTED CIRCUITS FOR ANALYSIS OF LOAD DISTRIBUTION MODES OF TWO POWER LINE

When distributing loads between various sources of electricity and power transmission lines, it is possible to use SSSC. To calculate and analyze the distribution of active and reactive powers in the electrical equipment of electric power systems, mathematical and computer models have been built. The modeling was carried out according to the methodology for calculating systems by interconnected subsystems, which ensures the minimum consumption of computer time. One of the possible structures of the control system has been developed. The results of calculating electromagnetic processes in a specific electric power system with a voltage of 10.5 kV are presented. It is shown that SSSC allows one to realize only one control function, for example, to provide a given distribution of reactive power between two transmission lines. Other devices should provide other functions of stabilization of a given mode of operation of the system. For example, the stabilization of the load voltage and the distribution of the active power of the two transmission lines must be provided by the power sources.

STATCOM, electric power system, power lines, simulation, load distribution, SSSC

УДК 621.372

К. С. Горшков, М. В. Никитина, Б. Ю. Тищук Университет ИТМО

Синтез схем с отрицательной групповой задержкой

Обсуждается явление отрицательной групповой задержки в линейных электрических цепях. Рассмотрены физически реализуемые передаточные функции второго порядка и определены условия, при которых групповая задержка может принимать отрицательные значения. Выведены формулы для расчета частоты среза отрицательной групповой задержки. Предложен алгоритм синтеза, обеспечивающий генерацию структур и расчет численных значений параметров электрических цепей с отрицательной групповой задержкой. В основе алгоритма лежит метод схемных определителей. Представлены примеры структурного синтеза активных четырехполюсников на операционном усилителе по предложенному алгоритму. Для каждой рассмотренной передаточной функции второго порядка с отрицательной групповой задержкой получена ARLCили ARC-схема. Для одной из схем также выполнен параметрический синтез и проведен численный анализ. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами моделирования в системе LTspice XVII.

Групповая задержка, отрицательная групповая задержка, синтез электрических цепей, активный четырехполюсник

В процессе прохождения сигнала через частотно-зависимую электрическую цепь, или при его распространении в некой среде, например в воздухе, все частотные компоненты сигнала при-