

РГБ ОД

22 ДЕК 2000

На правах рукописи

МАСАЛЕВ Дмитрий Юрьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ВЫБОРА
ХАРАКТЕРИСТИК СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО ИНДУКТИВНОГО
НАКОПИТЕЛЯ В СИСТЕМЕ ПРОТИВОАВАРИЙНОГО
УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.14.02 – "Электрические станции
(электрическая часть), сети, электроэнергетические системы
и управление ими"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре "Релейная защита и автоматизация энергосистем" Московского энергетического института (технического университета).

Научный руководитель: член-корреспондент РАН,
доктор технических наук,
профессор А.Ф. Дьяков

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
с.н.с В.И. Кочкин

кандидат технических наук,
доцент Д.В. Никитин

Ведущая организация: Филиал РАО "ЕЭС России". Объединенное
диспетчерское управление энергосистемами
Северо-Запада, г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 15 декабря 2000 г. в 15 час. 00 мин.
в аудитории Г-200 на заседании диссертационного совета К 053.16.17 Москов-
ского энергетического института (технического университета) по адресу:
г.Москва, ул.Красноказарменная, д.17., 2 этаж, корпус «Г».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ (ТУ).

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по
адресу: 111250, г.Москва, ул.Красноказарменная, д.14. Ученый совет МЭИ(ТУ).

Автореферат разослан 8 ноября 2000 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
К 053.16.17

Сегур

Сыромятников С.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Опыт формирования крупных энергообъединений показывает, что по мере развития и усложнения электроэнергетических систем (ЭЭС) ухудшаются их динамические свойства, усложняется управление, повышается опасность каскадного развития аварий. Это обостряет проблемы обеспечения устойчивости систем. Поскольку чрезмерное усложнение систем управления электроэнергетическими системами может существенно затруднить их реализацию и эффективное функционирование, особенно в аварийных ситуациях, то необходимо искать новые принципы и средства управления крупными энергосистемами.

Одним из средств решения данных проблем является использование сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии (СПИН). В качестве сфер применения СПИН рассматриваются регулирование перетоков по связям переменного тока, поддержание уровня напряжений, демпфирование электро-механических колебаний (особенно низкочастотных), компенсация внезапных кратковременных небалансов активной мощности и ряд других.

В то же время, существующее разнообразие в представлении о функционировании сверхпроводникового индуктивного накопителя в электроэнергетической системе не позволяет при проектировании систем противоаварийного управления сделать вывод об эффективности его использования как силового элемента в структуре управления ЭЭС. В связи с этим разработка методов определения энергетических и технических характеристик сверхпроводниковых индуктивных накопителей, а также оценка эффективности использования СПИН при решении задач управления энергосистемами являются, несомненно, актуальными.

Актуальность проведенных в диссертационной работе исследований подтверждается также началом промышленного внедрения сверхпроводниковых накопителей в электроэнергетику промышленно развитых стран и использованием полученных в диссертации результатов при проектировании систем противоаварийного управления энергетическими системами в отечественных проектных институтах.

Целью диссертационной работы является разработка методов определения энергетических и технических характеристик сверхпроводниковых индуктивных накопителей и использование полученных результатов для проектирования систем противоаварийного управления электроэнергетическими системами.

Методы исследования. При решении поставленных задач были использованы методы теории электрических цепей, теории автоматического управления, методы математического моделирования.

Научная новизна результатов, полученных в диссертационной работе, заключается в следующем.

1. Разработаны новые методы определения энергетических и технических характеристик СПИН, обеспечивающих выполнение требуемых задач управления с учетом возможности направленного регулирования активной мощности накопителя.

2. Разработаны новые методы определения требуемых объемов управляющих воздействий на изменение активной мощности СПИН, обеспечивающих сохранение устойчивости ЭЭС в динамических режимах.

3. Разработаны новые алгоритмы расчета энергоемкости СПИН.

4. Разработаны новые алгоритмы расчета технических характеристик СПИН, базирующиеся на представлении его магнитной системы в виде соленоидальной конструкции.

Практическая значимость работы. Разработаны алгоритмические и программные средства для определения технических параметров СПИН. Это позволяет оценить на этапе проектирования комплекса противоаварийных мероприятий в ЭЭС эффективность применения сверхпроводниковых накопителей для задач противоаварийного управления с учетом ограничений, накладываемых на технические характеристики СПИН.

Использование результатов работы. Разработанные методы и программы использовались при проектировании систем противоаварийного управления в работах ОАО "Институт "Энергосетьпроект".

Апробация результатов работы и публикации. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Открытой научно-

практической конференции "Оценка технического состояния электрооборудования энергосистем и определение перспектив надежной работы ЕЭС России" (Москва, 1999 г.), Всемирном электротехническом конгрессе "ВЭЛК – 99" (Москва, 1999 г.), Конференции молодых специалистов электроэнергетики – 2000 (Москва, 2000 г.). Разработанные программные средства (программно-вычислительный комплекс "СПИН") зарегистрированы в Российском агентстве по патентам и товарным знакам (регистрационный номер № 990813). По теме диссертации опубликовано 4 работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (74 наименования) и приложений. Основной текст изложен на 101 страницах машинописного текста. Работа включает 47 рисунков. Приложения составляют 36 страниц машинописного текста

Научным консультантом по данной работе являлся на протяжении всех этапов ее выполнения доктор технических наук, с.н.с. И.В. Якимец.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен обзор существующих средств управления энергосистемами и показана необходимость использования новых принципов и средств управления крупными ЭЭС. В качестве одного из таких средств рассматривается сверхпроводниковый индуктивный накопитель энергии (СПИН), структурная схема которого изображена на рис. 1.

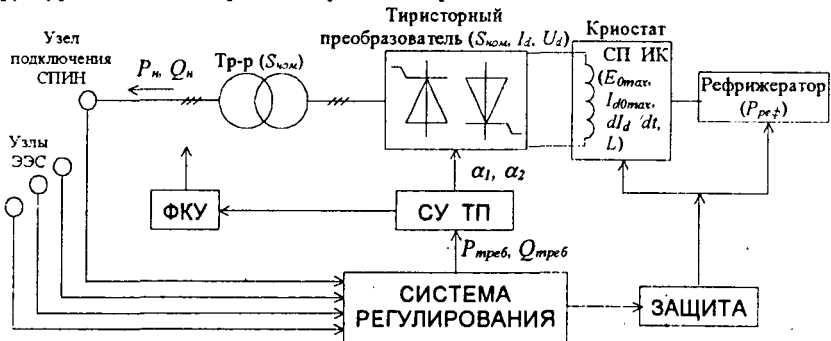


Рис. 1 Структурная схема СПИН.

Сверхпроводниковый индуктивный накопитель состоит из одной или нескольких индуктивных катушек, выполненных из сверхпроводникового материала, имеющих систему криообеспечения (криостат, рефрижератор) и защиту от перехода в нормальную фазу, обратимого тиристорного преобразователя, служащего для связи накопителя с сетью, и фильтрокомпенсирующего устройства, предназначенного для подавления высших гармонических составляющих, генерируемых тиристорным преобразователем.

Управление активной и реактивной мощностью СПИН в соответствии с требуемыми законами осуществляется системой регулирования, воздействующей через систему управления тиристорным преобразователем (СУТИ) на изменение углов управления тиристоров (α_1, α_2).

Проведенный обзор проектируемых и работающих систем СПИН показал, что уже в настоящее время существует возможность технической реализации накопителей энергоемкостью порядка 10^9 Дж при относительно небольших капитальных затратах. Вместе с тем существуют ограничения на использование сверхпроводниковых индуктивных накопителей в электроэнергетических системах с точки зрения как экономической целесообразности их применения, так и технической реализации. Поэтому необходимо иметь возможность оценить эффективность использования СПИН как силового элемента в структуре ЭЭС при решении поставленных задач управления энергосистемами.

В диссертации предложены следующие этапы выбора характеристик сверхпроводникового индуктивного накопителя.

1. Оценка объема управляющих воздействий системы противоаварийного управления ЭЭС на изменение активной мощности СПИН, исходя из необходимости решения следующих задач:

- ограничение выбега угла ротора генератора после сильных возмущений;
- снижение кратковременного дефицита мощности в энергосистеме;
- ограничение колебаний мощности по электропередаче и демпфирование низкочастотных колебаний.

2. Определение энергетических характеристик (энергоемкость, выпрямленный ток, напряжение) необходимых для реализации требуемых законов изменения активной мощности накопителя.

3. Определение технических характеристик основных элементов СПИН: сверхпроводниковой катушки, тиристорного преобразователя, осуществляющего связь накопителя с сетью.

4. Разработка технических требований, предъявляемых к СПИН системой противоаварийного управления энергосистемы.

Вторая глава посвящена разработке методов оценки объема управляющих воздействий на изменение активной мощности СПИН для сохранения устойчивости электроэнергетической системы и демпфирования колебаний активной мощности по электропередаче.

Оценка объема управляющих воздействий на изменение активной мощности СПИН для сохранения динамической устойчивости

Возможность и условия применения СПИН для противоаварийного управления ЭЭС рассматриваются на примере модели одномашиной системы, построенной на основе консервативного приближения и отражающей баланс моментов на валу эквивалентного генератора

$$\begin{aligned} \frac{d\delta}{dt} &= s, \\ T_J \frac{ds}{dt} &= P_{T\pi} - P \sin \delta - g(t), \\ P_{T\pi} &= P_T - E^2 y_{11} \sin \alpha_{11}, \quad P = EU y_{12}, \end{aligned} \quad (1)$$

где E – э.д.с. эквивалентного генератора за переходным реактивным сопротивлением, y_{11} , y_{12} – собственная и взаимная проводимости электропередачи, α_{11} – угол, дополняющий до $\pi/2$ аргумент собственного сопротивления, δ – угол между векторами э.д.с. генератора и напряжением U на шинах бесконечной мощности, s – скольжение угла, T_J – постоянная инерции генератора, P_T – механическая мощность турбины генератора, P – максимум характеристики передаваемой мощности, $g(t)$ – временная функция управляющих воздействий, формируемая накопителем. Положительное значение $g(t)$ соответствует режиму потребления СПИН активной мощности, отрицательное – режиму выдачи мощности в сеть.

В работе рассмотрены две формы импульса активной мощности СПИН.

в виде постоянного значения активной мощности, воздействующей на генератор, в течение времени, необходимого для достижения максимального

значения угла ротора генератора и последующего снижения этой мощности со скоростью, необходимой для отсутствия переторможения (рис. 2, кривая 1);

– в виде импульса постоянного значения активной мощности, достаточно-го для торможения ротора генератора до значения угла ротора меньше критиче-ского в послеаварийном режиме (рис. 2, кривая 2).

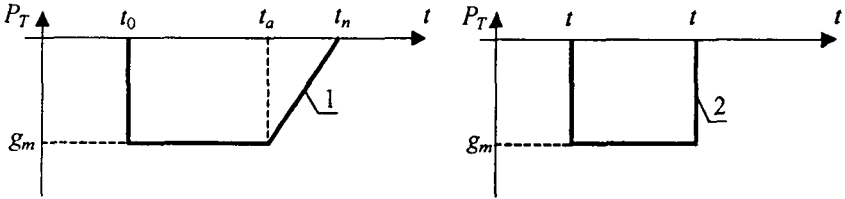


Рис. 2. Формы импульса активной мощности СПИН.

Для определения устойчивости свободного движения системы использует-ся второй метод Ляпунова. В качестве функции Ляпунова для модели (1) при-нято выражение полной энергии системы V , содержащее кинетическую K и по-тенциальную Π части

$$V = K + \Pi, \quad (2)$$

$$\text{где } K = T_J \frac{s^2}{2}, \quad (3)$$

$$\Pi = - \int_{\delta_0}^{\delta} [P_{TE} - P \sin \delta - g(t)] d\delta. \quad (4)$$

Условием сохранения устойчивости системы после возмущения является выполнение неравенства

$$V < V_{кр}, \quad (5)$$

где $V_{кр}$ – критериальная постоянная, соответствующая седлу функции V с наи-меньшим значением энергии в области углов

$$|\delta_1 - \delta_{i0}| \leq \pi. \quad (6)$$

При выборе амплитуды и длительности управляющих воздействий на из-менение активной мощности накопителя при изменении его мощности в соот-ветствии с кривой 1 (рис. 2) весь интервал времени $(t_0 \div t_n)$ работы накопителя разбивается на два участка $(t_0 \div t_a)$ и $(t_a \div t_n)$. На первом интервале программное регулирующее воздействие постоянно $g(t) = g_{max}$, на втором интервале – линей-но изменяется до нуля. После действия СПИН структура системы восстанавли-

вается, т.е. значения механических мощностей, подводимых к системе при $t > t_n$, соответствуют доаварийному режиму.

Для того, чтобы система была устойчива в начальный момент времени свободного движения, необходимо выполнение условия

$$V(t_0) < V_{кр}(g_{max}). \quad (7)$$

Так как на участке $(t_0 + t_a)$ изменения $g(t)$ не происходит, то система будет устойчивой на всем промежутке времени до $t = t_a$. Для ограничения устойчивости на участке линейного изменения $g(t)$ необходимо выполнение условия (5) в каждый момент времени.

При выборе значения g_{max} необходимо также учитывать тот факт, что ее уровень влияет на временные характеристики управляющих воздействий. Временные характеристики изменения активной мощности СПИН необходимо определить таким образом, чтобы в каждый момент времени выполнялось условие (5). Используя понятие "запаса устойчивости"

$$\Delta V'_g(\delta, s) = V_{кр}(g) - V'_g(\delta, s), \quad (8)$$

условие (5) можно переписать как

$$\Delta V'_g(t) > 0, \quad t_0 < t < t_n. \quad (9)$$

Для определения возможной скорости уменьшения модуля $g(t)$ необходимо выразить левую часть (9) через конкретные параметры системы. Для этого используется запись, эквивалентная (9)

$$\Delta V'_g(t) = \Delta V'_g(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{d\Delta V'_g(t)}{dt} dt > 0, \quad (10)$$

где $\Delta V'_g(t_0)$ - запас устойчивости в момент отключения аварии.

Условие устойчивости (9) выполняется на интервале времени $(t_0 + t_a)$ при $g(t) = g_{max}$, а на интервале времени $(t_a + t_n)$ приращение энергии от уменьшения модуля $g(t)$ приводит к уменьшению запаса устойчивости, что в свою очередь приводит к нарушению условия (9). Для возможности уменьшения модуля $g(t)$ его изменение на участке времени $(t_a + t_n)$ представляется в виде

$$g'(t) = g(t) + D_g s, \quad t \in (t_a, t_n), \quad (11)$$

при

$$|g'(t)| \leq |g_{max}| \quad (12)$$

Значение D_g выбирается из условия выполнения неравенства (12)

$$D_g = g_{\max} / s_{\max}, \quad (13)$$

где s_{\max} – максимальное скольжение системы без учета демпфирования накопителем.

Значение $|s_{\max}|$ определяется через кинетическую энергию системы. Учитывая, что $K \leq V(g_{\max})$

$$s_{\max} \leq \frac{1}{T_j} \sqrt{2I^*(g_{\max})}. \quad (14)$$

Таким образом, условие устойчивости с учетом (11) определяется выражением

$$\Delta V'_g(t) = \Delta V'_g(t_0) + \int_{t_0}^t (D_g s^2) dt - \int_{t_0}^t \frac{dg(t)}{dt} (\delta_{sp}(g) - \delta) dt > 0. \quad (15)$$

Из (15) следует, что необходимо обеспечить такой режим уменьшения модуля $g(t)$, при котором уменьшение запаса устойчивости полностью компенсировалось бы диссипацией энергии за счет демпфирующего воздействия накопителя. Оценка диссипации энергии накопителем оценивается приближенно с использованием вспомогательной функции координат, которая представляет собой изменяющуюся по области устойчивости степень однородности

$$\alpha(\Delta\delta) = \left(\Delta\delta \frac{\partial \Pi}{\partial \Delta\delta} \right) / \Pi(\Delta\delta), \quad (16)$$

где $\Delta\delta = \delta - \delta_0$ – изменение угла относительно точки устойчивого положения равновесия системы.

Управляя скоростью уменьшения модуля $g(t)$, можно добиться того, чтобы у системы был запас устойчивости не меньше заданного ΔV^* . Тогда можно гарантировать, что изображающая точка может быть лишь там, где $\alpha(\Delta\delta)$ больше α^* , соответствующего запаса устойчивости ΔV^* .

В результате критериальное неравенство имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta V^* - \frac{dg}{dt} [\delta_{sp}(g(t_0)) - \delta_0(g(t_0))] \cdot (t - t_0) \leq \Delta V'_g(t_0) + \frac{C}{(\alpha^* + 2)} \times \\ \times \left[\alpha^* \int_{t_0}^t V(t) dt + \int_{t_0}^t \frac{d\varphi}{dt} dt \right], \end{aligned} \quad (17)$$

где $C = 2D_g / T_j$, $\varphi = T_j \cdot s \cdot \Delta\delta$.

Используя оценки интегралов, входящих в (17), получен следующий алгоритм выбора временных характеристик управляющих воздействий. Значение интервала $(t_0 + t_a)$, в течение которого изображающая точка покинет окрестность критерциального седла ($dg/dt = 0$), определяется по выражению

$$t_a - t_0 = \frac{2\varphi_{\max}(t_a)}{\alpha^* V'(t_0)}, \quad (18)$$

где $\varphi_{\max}(t_0)$ – максимум функции φ , соответствующий энергии $V(t_0)$.

Значение интервала $(t_a + t_n)$ уменьшения модуля $g(t)$

$$t_n - t_a = \frac{g(t_a) [\delta_{sp}(g(t_a)) - \delta_0(g(t_a))] + \Delta V(g(t_n)) - \Delta V(g(t_a))}{\frac{V(t_a) + V(t_n)}{2}} \cdot \frac{(\alpha^* + 2)}{C\alpha^*}. \quad (19)$$

Формулы (18), (19) определяют на интервале $(t_0 + t_n)$ зависимость линейных участков $g(t)$, при которой гарантируется сохранение устойчивости при уменьшении модуля $g(t)$.

Длительность интервала $(t_0 + t_n)$ зависит от коэффициента однородности α^* . Чтобы уменьшить время действия программного управления, необходимо обеспечить в начальный момент запас устойчивости ΔV^* , которому соответствует наибольшее значение α^* , однако это приведет к увеличению модуля g_{\max} . Рекомендуется выбирать такое g_{\max} , при котором обеспечивается $\alpha^* = 1$, удовлетворяющее оптимальному соотношению между амплитудой управляющего воздействия и временем восстановления системы.

На рис. 3 – 4 приведены относительные значения управляющих воздействий $g_{\max} = P_{ys}$ и значения интервалов $(t_0 + t_a)$, $(t_a + t_n)$, построенные в функции относительной мощности турбины при различных значениях времени трехфазного к.з.

Определение значения g_{\max} и длительности $(t_0 + t_a)$ управляющего воздействия накопителя при характере его изменения в соответствии с кривой 2 (рис. 2) определяется из следующих условий.

Значение запаса устойчивости ΔV_g^* должна быть больше запаса устойчивости ΔV^* , соответствующего $\alpha^*(g) = 1$

$$\Delta V_g^* = V_{sp}(g_{\max}) - V(g_{\max}) \leq \Delta V^*. \quad (20)$$

Значение интеграла энергии $V(g)$ должно быть меньше граничного значения $V_{sp}(g)$:

$$V'(g_{max}) < V'_{sp}(g_{max}), \quad (21)$$

где $V'_{sp}(g_{max})$ определяется как минимальное значение энергии в пространстве углов, принадлежащих границе области устойчивости послеаварийного режима без программного управления.

Оценка длительности интервала $(t_0 + t_a)$ производится по выражению (18), определяющем интервал времени, в течение которого изображающая точка достигнет границы области соответствующей энергии $V(g_{max})$.

На рис. 5 – 6 приведены относительные значения управляющих воздействий $g_{max} = P_{yв}$ и значения интервалов $(t_0 + t_a)$, построенные в функции относительной мощности турбины при различных значениях времени трехфазного к.з.

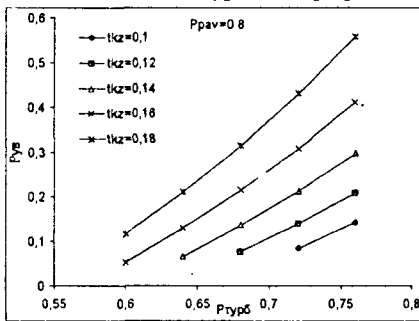


Рис. 3 Амплитуда управляющих воздействий

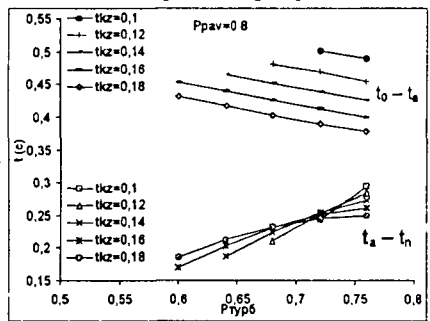


Рис. 4 Длительность интервалов времени $(t_0 + t_a)$, $(t_a + t_n)$

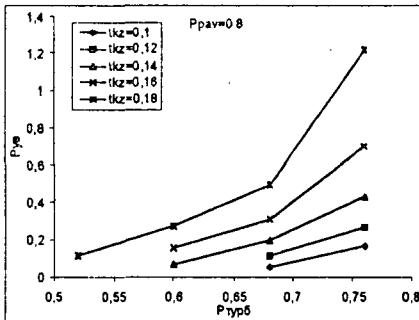


Рис. 5 Амплитуда управляющих воздействий

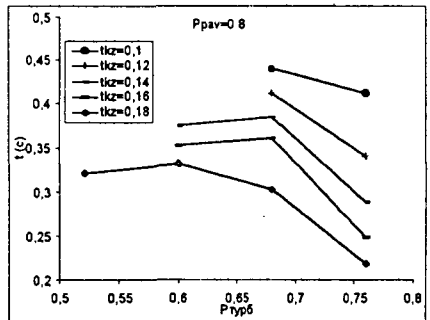


Рис. 6 Длительность интервалов времени $(t_0 + t_a)$

Выбор характеристик управления активной мощностью СПИН для демпфирования послеаварийных колебаний мощности на линиях связи электроэнергетических систем

Уравнение движения системы с учетом демпфирующей составляющей асинхронного момента и вынужденной нерегулярной гармонической составляющей имеет вид

$$T_j \frac{d\delta^2}{dt} = P_{\tau\tau} - P \sin \delta - P_d \frac{d\delta}{dt} + \Delta P \sin \lambda t, \quad (22)$$

где P_d - коэффициент демпфирования, ΔP и λ - соответственно амплитуда, и частота вынуждающей силы. Как правило, величина ΔP принимается равной 2% мощности меньшей из соединяемых энергосистем. Наиболее частому значению λ соответствует $f=0,35$ Гц.

Полагая в (22) $\Delta P \sin \lambda t = 0$, его можно использовать для оценки объема управляющих воздействий на изменение активной мощности накопителя в послеаварийном режиме передачи при использовании СПИН для ограничения колебаний мощности выше предельных значений.

Максимальный объем мощности, демпфируемый накопителем

$$P_{спин} = P \sin \delta - P_{\tau\tau}, \quad (23)$$

где $\delta = \delta_0 + \Delta\delta$.

В третьей главе рассмотрена возможность направленного регулирования активной мощности индуктивного накопителя.

В модели ЭЭС СПИН по отношению к узлу энергосистемы представляется источником синусоидального тока, амплитуда и фаза первой гармоники которого функционально связаны с углами управления вентилями преобразователя и значением выпрямленного тока накопителя. Допустимость представления работы СПИН источником тока соответствует индуктивному характеру накопления энергии и наличию глубокой отрицательной жесткой обратной связи, которой обычно охвачен преобразователь.

Влияние СПИН на распределение активной мощности оценивается на примере одномашинной схемы, изображенной на рис 7.

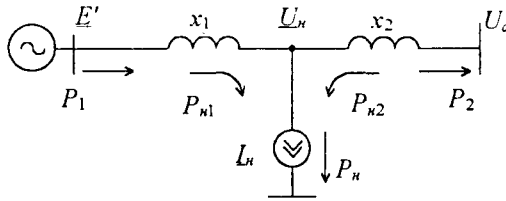


Рис. 7 Модель ЭЭС

Распределение активных мощностей по участкам с учетом действия СПИН:

$$P_{1\Sigma} = P_1 + P_{n1} = \frac{E'U_c}{x_1 + x_2} \sin(\delta) + E'I_n \frac{x_2}{x_1 + x_2} \cos(\delta - \alpha), \quad (24)$$

$$P_{2\Sigma} = P_2 + P_{n2} = \frac{U_c E'}{x_1 + x_2} \sin(\delta) - U_c I_n \frac{x_1}{x_1 + x_2} \cos(\alpha), \quad (25)$$

где δ – угол э.д.с. генератора E' относительно напряжения приемной системы U_c , P_{n1} , P_{n2} , – приращения активных мощностей по участкам от действия тока СПИН, I_n – значение модуля тока СПИН в сети переменного тока; α – угол тока СПИН относительно напряжения приемной системы.

Активная мощность СПИН определяется как

$$P_n = P_{1\Sigma} - P_{2\Sigma} = P_{n1} + P_{n2}. \quad (26)$$

Из выражений (24) – (26) видно, что, изменяя определенным образом значения амплитуды и фазы тока СПИН относительно напряжения приемной системы, можно получить требуемые по законам управления приращения активных мощностей по участкам при минимально необходимой активной мощности СПИН, т.е. обеспечить направленное регулирование активной мощности. Исходя из задач управления, возможны следующие варианты направленного регулирования активной мощности СПИН.

1. Локализация возмущений со стороны генератора. Воздействие СПИН необходимо выбирать таким образом, чтобы обеспечивалось постоянство активной мощности, передаваемой в сторону приемной системы $P_n = P_{n2} = P_2 - P_{2\text{прел}}$. Приращение активной мощности от СПИН со стороны генератора должно быть равно нулю $P_{n1} = 0$.

Следовательно, согласно (24) и (25)

$$\alpha = \delta \pm \pi/2, \quad (27)$$

$$I_n = \mp \frac{P_{n2}}{U_c} \cdot \frac{x_1 + x_2}{x_1} \sin(\delta). \quad (28)$$

2. Локализация возмущений со стороны приемной системы. В этом режиме необходимо обеспечить постоянство активной мощности, передаваемой со стороны генератора $P_n = P_{n1} = P_{1проб} - P_1$. Приращение активной мощности от СПИН со стороны приемной системы равно нулю $P_{n2} = 0$.

В результате, согласно (24) и (25)

$$\alpha = \pm \pi / 2, \quad (29)$$

$$I_n = \pm \frac{P_{n1}}{E'} \cdot \frac{x_1 + x_2}{x_2} \sin(\delta). \quad (30)$$

3. Локализация возмущений со стороны генератора и одновременное демпфирование колебаний роторов генераторов, возникших в результате возмущения. Приращения активных мощностей определяются из условий:

$$P_{n2} = P_2 - P_{2уст} = U_c I_n \frac{x_1}{x_1 + x_2} \cos(\alpha), \quad (31)$$

$$P_{n1} = k_{дл} s = E' I_n \frac{x_2}{x_1 + x_2} \cos(\delta - \alpha), \quad (32)$$

где $k_{дл}$ – коэффициент демпфирования колебаний; s – скольжение угла ротора генератора. Амплитуда и фаза тока выбираются на основе решения системы уравнений (31) – (32).

Во всех указанных случаях необходимо обеспечить независимое регулирование амплитуды и фазы тока СПИН относительно напряжения приемной системы. Для выполнения этого условия в качестве устройств связи накопителя с сетью используются схемы двухпараметрического преобразования. Изменяя углы управления преобразователем, можно обеспечить независимое изменение модуля тока СПИН и его угла относительно вектора напряжения в точке подключения.

Значение амплитуды тока СПИН без учета коммутации вентиля определяются в соответствии с выражением

$$I_n = k_{cx} I_d 2 \cos \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}, \quad (33)$$

где k_{cx} – коэффициент, зависящий от схемы связи; α_1, α_2 – углы управления тиристорным преобразователем; I_d – ток протекающий в сверхпроводниковой катушке накопителя.

Выражение для фазы тока СПИН относительно напряжения приемной системы имеет вид:

$$\alpha = \gamma_0 + \arcsin\left(\frac{k_{ex} I_d (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) \cdot x_1 x_2}{U_{н0} (x_1 + x_2)}\right) - \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}, \quad (34)$$

где γ_0 – значение угла вектора напряжения U_H в точке подключения СПИН относительно напряжения приемной системы при $P_H = 0$, $U_{н0}$ – напряжение в точке подключения накопителя при $I_H = 0$.

Диаграмма изменения амплитуды и фазы тока СПИН при изменении углов α_1, α_2 для тиристорных преобразователей с естественной коммутацией приведена на рис. 8.

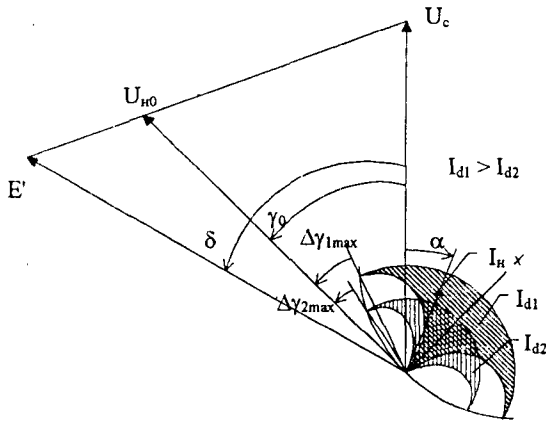


Рис. 8. Диапазоны изменения амплитуды и фазы тока СПИН.

В четвертой главе изложены алгоритмы определения характеристик СПИН в зависимости от характера изменения активной мощности накопителя.

Определение энергетических характеристик СПИН при нелинейном графике изменения активной мощности

При определении энергоемкости сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии (СПИН) необходимо учитывать функциональные возможности накопителя, ограниченные характером изменения активной и реактивной мощностей, допустимой скоростью изменения тока в сверхпроводниковой обмотке, диапазоном возможной реализации углов управления тиристорных пре-

образователей, осуществляющих связь накопителя с сетью, значением допустимого выпрямленного напряжения на токовводах, механическими напряжениями на обмотке, значением магнитной индукции на поверхности обмотки, уровнем остаточной емкости СПИИ. Предлагаемая методика основана на кусочно-линейной аппроксимации требуемого закона изменения активной мощности.

В данной главе приведен комплекс уравнений, определяющий требования к параметрам накопителя для режима энергообмена с линейным изменением активной мощности для каждого из участков аппроксимации.

Линейный характер изменения активной мощности:

$$P(t) = P_1 + ((P_2 - P_1)/\tau) \cdot t, \quad (35)$$

где P_1 - мощность в начальный момент времени; P_2 - мощность в конечный момент времени; τ - значение интервала времени.

Уравнение баланса энергии:

$$E_0 \cdot (1 - \xi) = P_{cp} \cdot \tau, \quad (36)$$

где E_0 - максимальная энергия запасенная в накопителе; ξ - коэффициент глубины разряда; $P_{cp} = (P_1 + P_2)/2$ - средняя мощность за интервал времени τ .

Непрерывность изменения тока и энергии накопителя учитывается следующими соотношениями:

$$E_{0i} \cdot \xi_i = E_{0i+1}, \quad (37)$$

$$I_{d0i} \cdot \sqrt{\xi_i} = I_{d0i+1}, \quad (38)$$

где i - номер интервала ($(i + 1)$ - для режима разряда, $(i - 1)$ - для режима заряда), I_{d0} - ток, соответствующий максимальной энергии накопителя на интервале энергообмена, $I_{d0} \sqrt{\xi}$ - ток соответствующий минимальной энергии накопителя на интервале энергообмена.

Определение энергетических характеристик индуктивного накопителя при демпфировании колебаний мощности по электропередаче

При определении требуемой емкости СПИИ для демпфирования колебаний активной мощности необходимо учитывать общий характер процесса изменения энергии: разряд (рис. 9) и заряд (рис. 10).

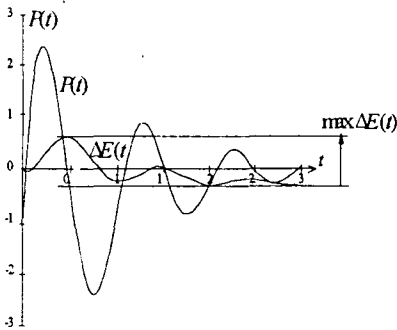


Рис. 9. Диаграмма мощности
и энергии (разряд)

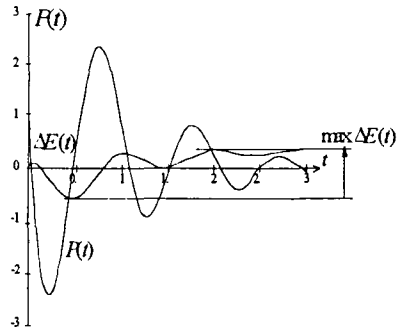


Рис. 10. Диаграмма мощности
и энергии (заряд)

Накопитель вводится в работу с некоторой начальной энергией E_0 , которая должна быть такова, чтобы обеспечить выполнение процесса обмена энергией в соответствии с диаграммой изменения мощности.

При этом график зависимости изменения энергии СПИН во времени

$$E(t) = E_0 + \Delta E(t) \quad (39)$$

смещен относительно графика $\Delta E(t)$ на величину E_0 .

Кроме выполнения общего баланса энергии необходимо также обеспечить условия работы тиристорного преобразователя в каждый текущий момент времени

$$P(t) = \frac{6\sqrt{2}U(t)I_d(t)}{\pi K_T} \cos \theta \cos \varphi, \quad (40)$$

$$\theta = (\alpha_1 - \alpha_2)/2, \varphi = (\alpha_1 + \alpha_2)/2,$$

где U – напряжение в узле присоединения СПИН к энергосистеме, I_d – значение выпрямленного тока накопителя, K_T – коэффициент трансформации преобразовательного трансформатора, α_1 , α_2 – углы управления вентилями мостов тиристорного преобразователя.

В четвертой главе так же приведены оценки геометрических размеров сверхпроводниковой обмотки накопителя и потерь энергии, возникающих в процессе работы СПИН.

Оценка геометрических размеров основана на представлении обмотки в виде соленоидальной конструкции. Оценка потерь учитывает потери в мате-

риале сверхпроводника, потерь в материале матрицы провода, а также индукционные потери в криостатах и тепловых экранах.

В пятой главе для доказательства достоверности и эффективности предложенных методов приведены результаты вычислительных экспериментов, которые показали хорошее совпадение с результатами, полученными на основе предложенных методов.

В конце главы приведены оценка геометрических размеров магнитной системы и оценки потерь энергии СПИН энергоемкостью $2,5 \cdot 10^8$ Дж, в режимах демпфирования импульсных и гармонических колебаний мощности по электропередаче.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Сформулированы основные положения оценки технической эффективности использования СПИН в качестве силового элемента системы противоаварийного управления ЭЭС на этапе ее проектирования.
2. Разработаны новые методы оценки величины и характера управляющих воздействий системы противоаварийного управления ЭЭС на изменение активной мощности СПИН, обеспечивающих сохранение устойчивости ЭЭС в динамических режимах.
3. Определен вид уравнений для оценки амплитуд и характера изменения активной мощности СПИН в режимах послеаварийных и нерегулярных колебаний.
4. Определены зависимости, позволяющие реализовать направленное регулирование активной мощности СПИН на основе двухпараметрического управления активной и реактивной мощностью путем отдельного управления амплитудой и фазой тока СПИН.
5. Разработаны алгоритмы определения энергетических параметров накопителя, обеспечивающих реализацию требуемых управляющих воздействий.
6. Разработаны алгоритмы определения технических характеристик СПИН базирующиеся на представлении магнитной системы индуктивного накопителя в виде соленоидальной конструкции.

7. Разработанные алгоритмы определения энергетических и технических характеристик СПИН реализованы в виде программ для персональных ЭВМ, работающих под управлением операционной системы Windows 9x с возможностью их использования на этапе проектирования систем противоаварийного управления ЭЭС.
8. Достоверность использования метода выбора управляющих воздействий на изменение активной мощности СПИН подтверждена результатами вычислительного эксперимента.

Основные положения диссертационной работы отражены в следующих публикациях.

1. Якимец И.В., Глушкин И.З., Наровлянский В.Г., Масалев Д.Ю. Выбор технических характеристик и геометрических параметров сверхпроводниковых индуктивных накопителей для электроэнергетических систем // Тезисы Всероссийского электротехнического конгресса. – М.: «Академия», 1999. – Т.3. – С.26-28.
2. Якимец И.В., Наровлянский В.Г., Масалев Д.Ю. Оценка технических характеристик сверхпроводникового индуктивного накопителя при проектировании противоаварийного управления энергосистемой // Электротехника, 2000. - №6. – С.6-13.
3. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 990813 «Программно-вычислительный комплекс «СПИН» / Якимец И.В., Наровлянский В.Г., Масалев Д.Ю. – Реестр программ для ЭВМ, 1999.
4. Масалев Д.Ю. Условия направленного регулирования активной мощности сверхпроводникового индуктивного накопителя в электроэнергетических системах // Конференция молодых специалистов электроэнергетики: Сб. докл. – М.: «НЦ ЭНАС», 2000. –С.119-121.