

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ, СОДЕРЖАЩИХ ВСТАВКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В мировой электроэнергетике наметилась устойчивая тенденция формирования крупных межгосударственных энергообъединений, включая трансконтинентальные. Вместе с тем, опыт эксплуатации одного из таких энергообъединений – Единой электроэнергетической системы бывшего СССР - выявил в середине 80-х годов прошлого столетия ряд существенных и опасных недостатков параллельной синхронной работы территориально распределенных электрических систем, которые следует учитывать при создании энергообъединений такого рода.

Формирование энергообъединений стран Евросоюза UCPTЕ и стран Восточной Европы CENTREL базируется на соблюдении ряда требований, предъявляемых к входящим в их состав энергосистемам. Основные из этих требований можно свести к условиям обеспечения

самодостаточности отдельных частей, их способности, в случае аварийной локализации энергосистемы, самостоятельно покрывать нагрузку собственных потребителей. Тем не менее, опыт крупнейших энергетических аварий в 2003–2006 гг. в США и Европе показал, что проблема организации параллельной синхронной работы энергосистем в составе энергообъединений представляет актуальную задачу современности.

Перспективы включения объединенной энергосистемы (ОЭС) Украины на параллельную работу с энергообъединением UCPTЕ, даже при выполнении вышеупомянутых условий, резко повышают актуальность задач организации устойчивой параллельной работы ОЭС Украины.

Одной из важнейших проблем организации параллельной работы энергосистем в составе мощных энергообъединений является практическое отсутствие управляемости перетоками активной мощности по межсистемным связям, особенно по, так называемым, слабым связям. Это обстоятельство приводит к резкому снижению уровня надежности и живучести энергообъединений и, как следствие, к опасности возникновения вторичных аварийных возмущений на существенном территориальном отдалении от мест первичных аварий.

Накопленный опыт эксплуатации крупнейших энергообъединений показывает, что перечисленные недостатки в организации параллельной работы в значительной мере могут быть успешно нейтрализованы за счет использования таких устройств, как вставки постоянного тока (ВПТ), асинхронные электромеханические муфты и др. Очевидные преимущества применения таких устройств, размещаемых, в первую очередь, на межгосударственных и важнейших межсистемных слабых связях, включая транзиты 110–220 кВ, состоят в способности эффективно осуществлять аварийную разгрузку связей; существенным образом улучшать эксплуатационные характеристики объединяемых энергосистем; повышать устойчивость параллельной работы; удерживать локальные энергосистемы от полного погашения; обеспечивать многомиллионную экономию от повышения надежности энергоснабжения потребителей; быть действенным дополнением к вращающемуся резерву ОЭС.

ВПТ, в частности, представляет собой один из важнейших системных элементов многофункционального значения, основными функциями которого являются секционирование крупных ОЭС с целью эффективного управления перетоками мощности; обеспечение устойчивости работы слабых связей; существенное повышение надежности параллельной работы энергосистем; организация связи ОЭС с различными стандартами частоты и качества электроэнергии; эффективное обеспечение коммерческого экспорта электроэнергии.

Игнорирование перспектив использования ВПТ в электроэнергетике Украины существенно усложняет задачу объединения ОЭС Украины на параллельную работу с энергообъединением Евросоюза UCPTЕ, которая на ближайшую перспективу является весьма проблематичной и вряд ли осуществимой.

На сегодня в отечественной практике планирования, исследования и анализа режимов работы электрических систем практически отсутствуют адекватные математические модели устройств обеспечения параллельной работы энергосистем в составе энергообъединений, отличающиеся высокой точностью и вычислительной надежностью не только для динамических, но и для установившихся режимов электрических систем (ЭС). Одной из причин такого положения является сложность моделирования режима ВПТ в нормальных и аварийных ситуациях. Дело в том, что ВПТ представляют собой весьма сложные резко нелинейные элементы, моделирование которых требует разработки и исследования специальных алгоритмов расчета параметров рабочего режима собственно ЭС. Поэтому первоочередной задачей является разработка надежных алгоритмов и программ расчета установившихся режимов работы ЭС с учетом ВПТ.

В наиболее общем виде ВПТ представляет собой выпрямительно-инверторный блок, состоящий из последовательно соединенных выпрямителя и инвертора, подключаемых к электрической сети через автотрансформаторы (рис. 1) [1]. Потребление существенных объемов реактивной мощности преобразователями, необходимость фильтрации высших гармоник в приемной энергосистеме требует установки источников реактивной мощности (конденсаторных батарей, синхронных компенсаторов или статических тиристорных компенсаторов). Обычно ВПТ комплектуется из ряда таких блоков, несущих одинаковую нагрузку. Автотрансформатор, питающий преобразователь, работающий в выпрямительном режиме, обязательно комплектуется устройством РПН. Автотрансформатор преобразователя, работающего в инверторном режиме, может иметь фиксированный коэффициент трансформации.

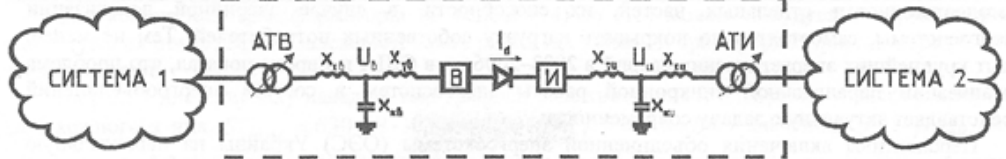


Рис. 1. Принципиальная схема блока ВПТ

Расчетная модель установившегося режима ЭС, содержащей ВПТ, должна быть скорректирована следующим образом. ВПТ моделируется двумя дополнительными узлами, соответствующими точкам подключения выпрямительного и инверторного преобразователя ВПТ. Фиктивные мощности этих узлов составляют:

$$\begin{aligned} \dot{S}_в &= P - jQ_в; \\ \dot{S}_и &= -P - jQ_и. \end{aligned}$$

где P – активная мощность, передаваемая по ВПТ;

$Q_в$ и $Q_и$ – реактивные мощности, потребляемые выпрямителем и инвертором соответственно.

Величины реактивных мощностей $Q_в$ и $Q_и$ определяются значениями коэффициентов мощности на соответствующих шинах ВПТ. Последние зависят от углов зажигания выпрямителя и погасания инвертора [1]:

$$\begin{aligned} \cos \varphi_в &= \cos \alpha - \frac{x_{тв} I_d}{\sqrt{2} U_в}; \\ \cos \varphi_и &= \cos \delta - \frac{x_{ти} I_d}{\sqrt{2} U_и}, \end{aligned} \tag{1}$$

где α и δ – углы зажигания выпрямителя и погасания инвертора;

$x_{тв}$ и $x_{ти}$ – эквивалентные реактивные сопротивления вентилях;

$U_в$ и $U_и$ – уровни напряжения на входе выпрямителя и выходе инвертора соответственно;

I_d – величина выпрямленного тока ВПТ.

Таким образом, в процессе реализации расчетной математической модели установившегося режима ЭС определяются уровни напряжения на шинах ВПТ со стороны выпрямителя и инвертора соответственно. В свою очередь, моделирование работы ВПТ заключается в определении углов зажигания выпрямителя и погасания инвертора и реактивных мощностей, потребляемых вентилями преобразователями.

Очевидно, что расчет параметров установившегося режима ЭС, содержащей ВПТ, должен быть итерационным, поскольку, согласно (1) реактивные мощности $Q_в$ и $Q_и$ зависят от уровней напряжения $U_в$ и $U_и$, которые определяются в процессе расчета параметров установившегося режима ЭС.

Рассмотрим подробнее математическое моделирование ВПТ в нормальном установившемся режиме работы. С целью упрощения математических выкладок при дальнейшем рассмотрении ВПТ пренебрежем ограничениями по току ВПТ, ограничениями по реактивной мощности выпрямителя и инвертора, возможностями регулирования режима напряжения средствами РПН автотрансформаторов. Также будем предполагать, что уровень выпрямленного напряжения неизменен и равен своему номинальному значению $U_{д0}$.

Основной характеристикой режима ВПТ является заданная активная мощность $P_{зад}$. Кроме того, расчет параметров установившегося режима ЭС переменного тока позволяет определить уровни напряжения $U_в$ и $U_и$, которые при моделировании ВПТ выступают в качестве исходных данных. В результате расчета необходимо определить реактивные мощности, потребляемые выпрямителем $Q_в$ и инвертором $Q_и$, а также внутренние регулируемые параметры ВПТ – значения углов зажигания выпрямителя α и погасания инвертора δ . При реализации расчетной модели установившегося режима в обязательном порядке необходимо учитывать ограничения, накладываемые на величины углов зажигания и погасания преобразователей, по допустимому диапазону изменения коэффициентов трансформации автотрансформаторов и предельному значению величины выпрямленного тока I_d .

Величина выпрямленного тока определяется из выражения [2]:

$$I_d = \frac{\sqrt{2}}{x_{\gamma\beta} - x_{\gamma\alpha}} (U_{\beta} \cos \alpha_0 - U_{\alpha} \cos \delta_0). \quad (2)$$

Анализ выражения (2) позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, внутренние эквивалентные реактивные сопротивления вентилей не могут быть одинаковыми. Во-вторых, для увеличения передачи мощности по ВПТ необходимо увеличить уровень напряжения на выпрямителе или снизить уровень напряжения инвертора. Такое регулирование можно осуществлять за счет изменения коэффициентов трансформации автотрансформаторов. В-третьих, для увеличения передачи мощности по ВПТ необходимо уменьшать угол зажигания выпрямителя или увеличивать угол погасания инвертора. Тут следует иметь в виду, что увеличение углов зажигания и погасания преобразователей приводит к уменьшению величин коэффициентов мощности и, как следствие, к увеличению потребления реактивной мощности преобразователями.

В системе регулирования ВПТ обычно применяется регулятор мощности интегрального типа [3], воздействующий на изменение уставок регулятора тока (РТ) и регулятора минимального тока (РМТ). Если выпрямленный ток, определенный по соотношению (2) оказывается выше уставки РТ ($I_d > I_{РТ}$), то принимается

$$I_d = I_{РТ} = \frac{P}{U_{d0}}.$$

Если выпрямленный ток оказывается ниже уставки РМТ ($I_d < I_{РМТ}$), то принимается

$$I_d = I_{РМТ} = I_{РТ} - \Delta I,$$

где ΔI – зона нечувствительности регулятора, в пределах которой выпрямленный ток имеет значение, получаемое из выражения (2).

При работе РТ угол погасания инвертора δ поддерживается неизменным, а регулирование осуществляется за счет изменения угла зажигания выпрямителя. Последний определяется из выражения:

$$\cos \alpha = \frac{U_{\beta}}{U_{\alpha}} \cos \delta_0 + \frac{x_{\gamma\beta} - x_{\gamma\alpha}}{\sqrt{2}} \frac{I_d}{U_{\beta}}.$$

При работе РМТ угол зажигания выпрямителя α поддерживается неизменным, а регулирование осуществляется за счет изменения угла погасания инвертора. Последний определяется из выражения:

$$\cos \delta = \frac{U_{\beta}}{U_{\alpha}} \cos \alpha_0 + \frac{x_{\gamma\beta} - x_{\gamma\alpha}}{\sqrt{2}} \frac{I_d}{U_{\beta}}.$$

В процессе регулирования углов зажигания и погасания преобразователей обязательно необходимо контролировать допустимость их значений:

$$\alpha_{\min} < \alpha < \alpha_{\max};$$

$$\delta_{\min} < \delta < \delta_{\max}.$$

Укажем, что обычно граничные значения углов зажигания и погасания преобразователей составляют [3]:

$$\alpha_{\min} = 5^\circ;$$

$$\delta_{\min} = 15^\circ;$$

$$\alpha_{\max} = \delta_{\max} = 40^\circ.$$

В зоне нечувствительности углы зажигания и погасания преобразователей не изменяются.

Непосредственное применение выражения (2) для уточнения углов регулирования режима ВПТ при расчетах параметров установившегося режима связано с определенными трудностями моделирования регулятора мощности. Здесь, по мнению авторов, удобнее использовать следующий подход.

Нетрудно показать, что активная мощность ВПТ определяется по выражению:

$$P = \frac{12}{\pi(x_{\gamma n} - x_{\gamma n})^2} \left[(x_{\gamma n} + x_{\gamma n}) U_b U_n \cos \alpha \cos \delta - x_{\gamma} U_b^2 \cos^2 \alpha - x_{\gamma n} U_n^2 \cos^2 \delta \right]. \quad (3)$$

Предположим, что величина активной мощности, определенная по (3), не будет совпадать со значением заданного транзита активной мощности $P_{зад}$. Пусть на очередной i -й итерации вычислительного процесса величина невязки активной мощности составляет $\Delta P^{(i)}$. Тогда, в соответствии с методом Ньютона решения нелинейного уравнения (3), такая невязка может быть уменьшена путем изменения углов зажигания или погасания преобразователей:

$$\begin{aligned} \cos \delta^{(i+1)} &= \cos \delta^{(i)} - \left(\frac{\partial P}{\partial \cos \delta} \right)_{(i)}^{-1} \Delta P^{(i)}; \\ \cos \alpha^{(i+1)} &= \cos \alpha^{(i)} - \left(\frac{\partial P}{\partial \cos \alpha} \right)_{(i)}^{-1} \Delta P^{(i)}. \end{aligned}$$

С целью обеспечения наименьшего потребления реактивной мощности преобразователями ВПТ расчет углов зажигания и погасания следует ориентировать на максимальное снижение этих углов.

Отметим, что использование рассмотренной итерационной модели ВПТ связано в резким ухудшением условий сходимости итерационного вычислительного процесса расчета параметров установившегося режима ЭС, содержащей ВПТ. В целях частичной нейтрализации этого негативного фактора авторами предлагается альтернативная безытерационная модель ВПТ. Последняя заключается в следующем.

Регулирование режима ВПТ осуществляется либо путем изменения угла зажигания выпрямителя α , либо путем изменения угла погашения инвертора δ . Анализ выражения (3) показывает, что последнее является уравнением второго порядка относительно переменных $\cos \alpha$ и $\cos \delta$. При расчете параметров конкретного установившегося режима одна из величин $\cos \alpha$ или $\cos \delta$ зафиксирована. Тогда задача определения значений регулирующих углов ВПТ сводится к решению квадратных уравнений

$$\cos^2 \delta - p_{\delta} \cos \delta + q_{\delta} = 0$$

либо

$$\cos^2 \alpha - p_{\alpha} \cos \alpha + q_{\alpha} = 0,$$

где

$$\begin{aligned} p_{\delta} &= \frac{(x_{\gamma n} + x_{\gamma n}) U_b U_n \cos \alpha}{x_{\gamma n} U_n^2}; \\ q_{\delta} &= \frac{12 x_{\gamma n} U_b^2 \cos^2 \alpha + \pi (x_{\gamma n} - x_{\gamma n})^2 P_{зад}}{12 x_{\gamma n} U_n^2}; \\ p_{\alpha} &= \frac{(x_{\gamma n} + x_{\gamma n}) U_b U_n \cos \delta}{x_{\gamma n} U_b^2}; \\ q_{\alpha} &= \frac{12 x_{\gamma n} U_n^2 \cos^2 \delta + \pi (x_{\gamma n} - x_{\gamma n})^2 P_{зад}}{12 x_{\gamma n} U_b^2}. \end{aligned}$$

Опыт проведенных авторами вычислительных экспериментов показал существенное превосходство безытерационной математической модели ВПТ в установившемся режиме работы ЭС по сравнению с итерационным алгоритмом с применением метода Ньютона для решения нелинейного алгебраического уравнения. В первую очередь эти преимущества относятся к улучшению условий сходимости итерационного вычислительного процесса расчета параметров

установившегося режима ЭС и, следовательно, повышению надежности и быстродействия вычислительного процесса.

Выводы

1. Регулируемая автоматическая ВПТ является сложным нелинейным элементом, резко ухудшающим условия сходимости итерационного расчета параметров установившегося режима ЭС. Это обстоятельство предъявляет жесткие требования к надежности математических моделей и алгоритмов работы ВПТ, прежде всего, в условиях установившихся режимов работы ЭС.
2. Разработана итерационная математическая модель ВПТ в установившемся режиме работы ЭС. Модель основана на применении метода Ньютона при решении нелинейного уравнения относительно значения регулирующего угла ВПТ.
3. Разработана безытерационная математическая модель ВПТ в установившемся режиме работы ЭС. Модель основана на решении квадратного уравнения относительно значения регулирующего угла ВПТ. Применение безытерационной модели ВПТ эффективно влияет на улучшение условий сходимости, быстродействия и надежности итерационного вычислительного процесса при расчете установившихся режимов ЭС, содержащих ВПТ.

Литература

1. Поссе А.В. Схемы и режимы электропередач постоянного тока. – Л.: Энергия, 1973, – 304 с.
2. Веников В.А., Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи переменного и постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 272 с.
3. Боярский А.И., Эйдель В.А. Система автоматического регулирования выпрямительно-инверторной подстанции// Разработка выпрямительно-инверторной подстанции для несинхронной связи энергосистем СССР и Финляндии. Сб. научных трудов НИИПТ. – Л.: Энергоатомиздат, 1984, – С. 13-22.