

УДК 621.311.1

ОПЕРАТИВНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ НОРМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ НЕОДНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ДАЛЬНИМИ ЭЛЕКТРО- ПЕРЕДАЧАМИ

В. В. Кулик

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра электрических станций и систем
Винницкий национальный
технический университет
Хмельницкое шоссе, 95,
г. Винница, Украина, 21021
E-mail: kulik_vv@mail.ru

Представлено вдосконалену математичну модель неоднорідності електричної системи з довгими лініями електропередачі змінного струму. Запропоновано метод формування керувальних впливів для регульовальних пристроїв такої системи. Їх реалізація дозволяє забезпечити максимальну ефективність транспортування електроенергії. Наведено особливості апаратної реалізації локального керування регульовальними пристроями електричної системи, а також результати натурного експерименту

Ключові слова: електрична система, довгі лінії електропередачі, неоднорідність, умови оптимальності, оптимальне керування

Представлена усовершенствованная математическая модель неоднородности электрической системы с дальними электропередачами переменного тока. Предложен метод формирования управляющих воздействий для регулирующих устройств такой системы. Их реализация позволяет обеспечить максимальную эффективность транспортировки электроэнергии. Приведены особенности аппаратно-программной реализации локального управления регулирующими устройствами электрической системы, а также результаты натурного эксперимента

Ключевые слова: электрическая система, дальние электропередачи, неоднородность, условия оптимальности, оптимальное управление

1. Введение

В статье приведены результаты исследований в области планирования энергоэффективных режимов электрических станций и систем.

Одним из основных показателей эффективности использования электроэнергии являются технологические расходы, связанные с ее транспортировкой от источников питания к потребителям. Анализ фактических расходов электроэнергии в Украине в последние годы [1] свидетельствует о превышении соответствующих показателей, характерных для стран Западной Европы [2]. Особенно это касается распределительных электросетей, для которых кроме конструктивного несоответствия современным условиям эксплуатации, характерно негативное влияние со стороны магистральных электросетей, обусловленное неоднородностью последних [2, 3].

Главной причиной повышенного расхода электроэнергии, в частности технической составляющей потерь, является низкая эффективность энергосберегающих мероприятий, что, в свою очередь, обусловлено недостаточным уровнем автоматизации контроля и управления режимами магистральных и распределительных электросетей [2, 3]. Развитие современных микропроцессорных систем, а также внедрение автоматизированных систем мониторинга режимов электрических сетей (ЭС), позволили получить необходимое информационное обеспечение для решения задач

оптимального управления потоками мощности [2] и взаимовлияния [3] ЭС. Кроме того появилась возможность интегрировать подсистемы автоматизации оптимального управления в состав автоматизированной системы диспетчерского управления (АСДУ).

Автоматизация оптимального управления потоками мощности в современных ЭС, развиваясь на базе существующих автоматизированных систем диспетчерского управления (АСДУ), требует разработки и усовершенствования технического, информационного и программного обеспечения. На сегодня в практике диспетчерского управления энергосистемами используется программно-технические средства оптимизации нормальных режимов ЭС, которые имеют ряд недостатков. Несовершенство математического и программного обеспечения связано, преимущественно, с использованием упрощенных математических моделей процессов транспортировки электроэнергии, которые были актуальными 20–30 лет назад [4, 5], и не соответствуют современному уровню аппаратного обеспечения. В составе аппаратного обеспечения, несмотря на его развитие в последнее время, практически отсутствуют специализированные информационные устройства связи между регулирующими устройствами ЭС (трансформаторами и автотрансформаторами с регулированием под нагрузкой (РПН) и др.) и управляющими электронно-вычислительными машинами (ЭВМ) [3, 6]. А без таких устройств невозможно взаимодействие программных средств

оптимального управления режимами электрических сетей и регулирующих устройств (РУ). Кроме того, автоматизированные системы, локализирующие отдельные функции централизованного управления за счет программного управления по местным параметрам, способны повысить надежность системы управления в целом и расширить ее функциональность в особых режимах работы.

Таким образом, вопросы совершенствования программно-аппаратного обеспечения АСДУ ЭС в направлении реализации оптимального управления их нормальными режимами за счет развития математических моделей и методов оптимизации параметров РУ, а также средств реализации таких параметров, являются актуальными.

2. Анализ литературных источников и постановка проблемы

Как известно [3, 4, 6], уменьшить дополнительные потери мощности и электроэнергии в ЭС, вызванные ее неоднородностью [4, 5], возможно путем регулирования напряжения в узлах ЭС, или введения в контуры уравнивающих э.д.с. При такой постановке задачи, управляемыми переменными являются контурные э.д.с, которые необходимо ввести за счет изменения коэффициентов трансформации трансформаторов для реализации оптимального токораспределения [5].

В [5] показано, что оптимальное значение потерь в ЭС достигается при относительных значениях э. д. с., которые рассчитываются по формулам:

$$\mathbf{E}_{*ur.a}(t) = \delta_a^E \mathbf{J}_{*r}(t), \mathbf{E}_{*ur.r}(t) = \delta_r^E \mathbf{J}_{*a}(t), \quad (1)$$

где $\mathbf{E}_{*ur.a}(t), \mathbf{E}_{*ur.r}(t)$ – векторы активных и реактивных составляющих относительных значений уравнивающих э. д. с.; $\mathbf{J}_{*a}(t), \mathbf{J}_{*r}(t)$ – векторы активных и реактивных составляющих относительных значений токов в узлах ЭС; $\mathbf{J}(t) = \hat{\mathbf{U}}_d^{-1}(t) \cdot \hat{\mathbf{S}}(t)$ – вектор узловых токов ЭС (символ «^» здесь и далее обозначает комплексно-сопряженные значения комплексных величин, а символ «d» указывает на диагональность матриц); $\hat{\mathbf{U}}_d(t), \hat{\mathbf{S}}(t)$ – диагональная матрица узловых напряжений и вектор узловых мощностей; δ_a^E, δ_r^E – матрицы критериев подобия [5].

В (1) все параметры представлены в относительных единицах. За базисные (обозначены индексом «b») приняты параметры идеального режима с точки зрения потерь мощности [4, 5], рассчитанного по r-схеме замещения ЭС.

Матрицы критериев подобия определяются по формулам [5]:

$$\begin{aligned} \pi_a^E &= -[\mathbf{E}_{ur.a}^{(b)}]_d^{-1} \mathbf{v}_r \mathbf{M}_\alpha^{-1} [\mathbf{J}_r^{(b)}]_d; \\ \pi_r^E &= [\mathbf{E}_{ur.r}^{(b)}]_d^{-1} \mathbf{v}_r \mathbf{M}_\alpha^{-1} [\mathbf{J}_a^{(b)}]_d, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mathbf{i} = \mathbf{N}_\alpha \mathbf{x}_\alpha \mathbf{r}_\alpha^{-1} - \mathbf{x}_k \mathbf{r}_k^{-1} \mathbf{N}_\alpha$ – матрица системных показателей неоднородности ЭС; $\mathbf{r}_k, \mathbf{x}_k$ – активная и реактивная составляющие матрицы контурных сопротивлений для системы базисных контуров; $\mathbf{M}_\alpha, \mathbf{N}_\alpha$ – матрицы соединения ветвей дерева схемы замещения ЭС, соответственно, в узлах и в контурах.

Соотношения (1) являются законами оптимального управления, в которых коэффициенты обратной связи имеют физический смысл критериев подобия [5]. Для реализации законов управления (1), разработана система автоматического управления (САУ) нормальными режимами ЭС [5, 6]. Основная функция системы заключается в том, чтобы поддерживать значение комплексного критерия оптимальности F^* в пределах установленной зоны нечувствительности δF^* . Предложенный в [6] критерий оптимальности позволяет учесть факторы надежности и экономичности транспортировки электроэнергии, а также ее качества [5, 6]. Результатом действия системы является приближение текущей траектории изменения потерь мощности в ЭС к оптимальной по заданным условиям эксплуатации [5]. Кроме того, как показано в [6], реализация управляющих воздействий, полученных на основании (1), обеспечивает снижение негативных последствий взаимовлияния магистральных и распределительных электросетей касательно потерь и уровней напряжения.

Однако, выражения (1) и (2) были получены с введением ряда допущений, необходимых для принятия решений на основе несовершенного информационного обеспечения:

- приведение параметров электросетей с трансформаторными связями к одному классу напряжения и, соответственно, невозможность учета несбалансированных коэффициентов трансформации в контурах ЭС;
- расчет емкостного генерирования и потерь на корону для линий электропередачи (ЛЭП) по номинальным напряжениям;
- моделирование режимов дальних электропередач без учета их волновых свойств.

Указанные допущения негативно влияют на адекватность моделирования оптимальных состояний ЭС [6, 7] и могут приводить к принятию и реализации неэффективных решений по управлению потоками мощности. Исходя из этого, задачей исследования является совершенствование метода оптимизации нормальных режимов неоднородных электрических сетей с дальними электропередачами.

3. Компенсация негативного влияния неоднородности электрических сетей с дальними электропередачами

3.1. Метод формирования управляющих воздействий для оптимизации потоков мощности в электрических сетях с дальними электропередачами

Негативное влияние неоднородности электросетей на оптимальность распределения электроэнергии в ЭС может быть описано фиктивными уравнивающими э.д.с. $\dot{\mathbf{E}}_{ur}$, которые приводят к появлению в замкнутых контурах уравнивающих токов и, таким образом, к отклонению реального токораспределения $\dot{\mathbf{I}}$ от экономичного $\dot{\mathbf{I}}_e$ [4, 5]. Для неоднородных электросетей, содержащих трансформаторные связи и длинные электропередачи, э.д.с. можно определить из выражения [8]:

$$\dot{\mathbf{E}}_{ur} = \dot{\mathbf{N}}_{Ak} \dot{\mathbf{Z}}_B (\dot{\mathbf{I}} - \dot{\mathbf{I}}_e), \quad (3)$$

где $\dot{\mathbf{N}}_{Ak}$ – матрица связей ветвей схемы замещения ЭС в ее контурах, построенная с учетом трансфор-

маторных связей и дальних электропередач [8]; $\dot{\mathbf{Z}}_v$ – диагональная матрица сопротивлений ветвей схемы замещения [8], в которой ветви дальних передач представлены постоянными четырехполюсника В [7, 8]; $\dot{\mathbf{I}}_e$ – вектор экономичных токов в ветвях схемы замещения электросетей, определенный на основании расчета экономичного режима электросетей с дальними электропередачами [8]; $\dot{\mathbf{I}}$ – вектор токов в ветвях, соответствующий реальному токораспределению.

Для компенсации негативного влияния неоднородности параметров электросетей ЭС за счет управления РУ в контуры необходимо ввести э.д.с. небаланса $\dot{\mathbf{E}}_{nb} \rightarrow -\dot{\mathbf{E}}_{ur}$. За счет этого токи небаланса $_{nb}$ частично или полностью компенсируют фиктивные уравнительные токи $\dot{\mathbf{I}}_{ur}$ [5], приблизив текущий режим ЭС к экономичному [4]. В общем случае для j -го контура системы базисных контуров [4, 5], э.д.с. небаланса определяется:

$$\dot{\mathbf{E}}_{nb_j} = \left(1 - \prod_{i \in TP_j} \dot{k}_i\right) \dot{\mathbf{U}}_b, \quad (4)$$

где \dot{k}_i – коэффициент трансформации i -го трансформатора, принадлежащего множеству трансформаторов j -го контура TP_j .

В [8] показано, что токораспределение в ЭС с дальними электропередачами, соответствующее минимально возможным потерям мощности (экономичное токораспределение [4]), может быть рассчитано по r -схеме замещения ЭС (по аналогии с [5]), при таких условиях:

- в схеме замещения учтены активные сопротивления элементов с сосредоточенными параметрами (для коротких ЛЭП и трансформаторов и т. п.) и действительные части постоянных четырехполюсников B (для дальних ЛЭП);

- коэффициенты трансформации в контурах принимаются сбалансированными относительно параметров трансформаторов, выполняющих регулирование напряжения (отсутствуют э.д.с. небаланса);

- коэффициенты распространения волны γ_0 [7, 9] и длины ЛЭП l соотносятся так, что в контурах с дальними ЛЭП не возникает э.д.с. небаланса (постоянные четырехполюсника $\dot{A}_i = \text{ch}(\gamma_{0i} l_i) = \text{idem}$).

Исходя из этого, выражения для определения векторов $\dot{\mathbf{I}}$ и $\dot{\mathbf{I}}_e$, как функций задающих токов $\dot{\mathbf{J}}$ в узлах схемы замещения ЭС могут быть представлены так:

$$\dot{\mathbf{I}} = \dot{\mathbf{Z}}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T (\dot{\mathbf{M}}_{Ak} \dot{\mathbf{Z}}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T)^{-1} (\dot{\mathbf{J}} - \dot{\mathbf{Y}}_b \dot{\mathbf{U}}_b) + \dot{\mathbf{Z}}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_b^T \dot{\mathbf{U}}_b, \quad (5)$$

$$\dot{\mathbf{I}}_e = \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T (\dot{\mathbf{M}}_{Ak} \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T)^{-1} (\dot{\mathbf{J}} - \mathbf{Y}_{Rb} \dot{\mathbf{U}}_b) + \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_b^T \dot{\mathbf{U}}_b, \quad (6)$$

где $\dot{\mathbf{M}}_{Ak} = \mathbf{M}^+ + \mathbf{M}^- \mathbf{A}_d \hat{\mathbf{K}}$ – матрица связей ветвей электрической сети в ее узлах с учетом идеальных трансформаторов и дальних электропередач [5, 8]; $\dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T = \mathbf{M}^{T+} + \mathbf{K} \mathbf{A}_d \mathbf{M}^{T-}$ – транспонированная матрица связей ветвей электрической сети в ее узлах (символ « T » здесь и далее обозначает операцию транспонирования матриц); \mathbf{M}^{T+} , \mathbf{M}^{T-} – матрицы, сформированные заменой соответственно, отрицательных или положительных элементов транспонированной матрицы соединений \mathbf{M}^T [4], нулями; \mathbf{K} , $\hat{\mathbf{K}}$, \mathbf{A}_d –

диагональные матрицы, соответственно, прямых и комплексно-сопряженных коэффициентов трансформации трансформаторных ветвей, а также постоянных четырехполюсника A для ветвей схемы замещения электрической сети; $\dot{\mathbf{Y}}_b$, $\dot{\mathbf{Y}}_{Rb}$ – матрицы, состоящие из столбцов матрицы узловых проводимостей, отвечающих балансирующим узлам электрической сети, определенной, соответственно, по полной схеме замещения и по r -схеме; $\dot{\mathbf{U}}_b$ – вектор напряжений балансирующих узлов электрической сети; $\dot{\mathbf{M}}_b^T$ – фрагмент матрицы связей, соответствующий балансирующим узлам электрической сети; \mathbf{R}_B – диагональная матрица активных сопротивлений ветвей (действительная составляющая матрицы сопротивлений $\dot{\mathbf{Z}}_B$); $\dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T$, $\dot{\mathbf{M}}_{Ak}$, $\dot{\mathbf{M}}_b^T$, \mathbf{Y}_{Rb} – матрицы связей и пассивных параметров схемы замещения ЭС, определенные с учетом условий расчета экономичного режима, представленных выше.

Подставив в (3) выражения для $\dot{\mathbf{I}}$ и $\dot{\mathbf{I}}_e$ после преобразований и упрощений было получено:

$$\dot{\mathbf{E}}_{ur} = \dot{\mathbf{E}}_{*nb,k} \dot{\mathbf{U}}_b - j(\dot{\mathbf{E}}_{*nb,\gamma} \dot{\mathbf{U}}_b + \dot{\mathbf{Z}}_{f,ur} \dot{\mathbf{J}}), \quad (7)$$

где $\dot{\mathbf{E}}_{*nb,k} = \dot{\mathbf{N}}_{Ak} \dot{\mathbf{M}}_b^T$ – матрица относительных контурных э.д.с., которые определяются несбалансированными коэффициентами трансформации и несогласованными коэффициентами распространения волны дальних ЛЭП (4); $\dot{\mathbf{E}}_{*nb,\gamma} = \dot{\mathbf{N}}_{Ak} \mathbf{X}_B \mathbf{R}_B^{-1} (\dot{\mathbf{M}}_b^T - \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T (\dot{\mathbf{M}}_{Ak} \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T)^{-1} \mathbf{Y}_{Rb})$ – матрица относительных контурных э.д.с., которая определяется перетоками мощности между балансирующими источниками электроэнергии ЭС и зависит от неоднородности системы; $\dot{\mathbf{Z}}_{f,ur} = \dot{\mathbf{N}}_{Ak} \mathbf{X}_B \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T (\dot{\mathbf{M}}_{Ak} \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T)^{-1}$ – матрица фиктивных контурных сопротивлений, определяющая уравнительные э.д.с., как функцию неоднородности продольных и поперечных параметров ЭС.

Из (7) видно, что составляющие $\dot{\mathbf{E}}_{*nb,\gamma}$ и $\mathbf{Z}_{f,ur}$ определяются соотношением реактивных и активных сопротивлений ветвей схемы замещения ЭС, коэффициентами трансформации трансформаторов и коэффициентами распространения волны дальних электропередач (в виде постоянных четырехполюсника A). Таким образом, отсутствие уравнительных э.д.с. в контурах характерно только для электросетей, в которых все ветви соответствуют классическому условию однородности [4] $x_i/r_i = \text{idem}$. Кроме этого, коэффициенты трансформации в контурах должны быть сбалансированными, а для дальних ЛЭП должны быть согласованными коэффициенты распространения волны $\gamma_i = \sqrt{(r_i + jx_i)(g_i + jb_i)} = \text{idem}$ [7]. Исходя из последнего, обеспечить однородность электросетей с дальними ЛЭП проектными мероприятиями является практически невозможным, особенно учитывая существенную зависимость их поперечных проводимостей g_i , b_i от случайных воздействий окружающей среды. Для обеспечения режимов их работы, близких к экономичным [4], целесообразно использовать системы оптимального управления трансформаторами связи с продольно-поперечным регулированием.

Для случая ЭС с единственным базисно-балансирующим узлом $\dot{\mathbf{E}}_{*nb,\gamma} = 0$, а э.д.с. небаланса определяются только несбалансированными коэффициентами трансформации. Оптимальное корректирование указанных параметров РУ обеспечивает выполнение

условия экономичности токораспределения в ЭС и, соответственно, перетоков мощности ($\dot{\mathbf{E}}_{ur} \rightarrow 0$).

Если ставится задача оптимизации потокораспределения ЭС с несколькими балансирующими источниками электроэнергии, то к э.д.с. небаланса добавляется составляющая, определяемая перетоками мощности между источниками $\dot{\mathbf{E}}_{nb,\gamma} \dot{\mathbf{U}}_b$. Исходя из этого, компенсировать уравнительные э.д.с. в этом случае можно, кроме указанного выше, регулированием напряжения в центрах питания (изменением генерирования реактивной и активной мощностей в ЭС).

Условие обеспечения экономичного токораспределения $\dot{\mathbf{E}}_{ur} = 0$, исходя из (7) может быть представлено так:

$$\dot{\mathbf{E}}_{nb,k}^{opt} = j(\dot{\mathbf{E}}_{nb,\gamma} \dot{\mathbf{U}}_b + \dot{\mathbf{Z}}_{f,ur} \mathbf{j}), \quad (8)$$

где $\dot{\mathbf{E}}_{nb,k}^{opt} = \dot{\mathbf{E}}_{nb,k}^{opt} \dot{\mathbf{U}}_b$ – вектор оптимальных контурных э.д.с. небаланса, которые по физической природе могут быть реализованы изменением параметров РУ. Оптимальное значение коэффициента трансформации регулирующего трансформатора \dot{k}_0^{opt} для j -го базисного контура, начинающегося с i -го балансирующего узла, исходя из (4) и учитывая влияние коэффициентов распространения волны дальних ЛЭП [8], может быть определено по выражению:

$$\dot{k}_0^{opt} = \left(1 - \dot{\mathbf{E}}_{nb,k_j}^{opt}\right) / \left(\prod_{s \in TP_j} \dot{k}_s \cdot \prod_{s \in DL_j} \dot{A}_s \right), \quad (9)$$

где \dot{A}_s – постоянная четырехполюсника для s -ой ЛЭП [8], входящей в множество дальних линий j -го контура DL_j .

Таким образом, используя выражения (7), (8) можно определять оптимальные коэффициенты трансформации регулирующих трансформаторов с учетом изменения нагрузки потребителей, планового генерирования источников электроэнергии, а также последствий первичного регулирования напряжения. В отличие от (1), в (7), (8) учитывается также влияние особенностей процесса транспортировки электроэнергии посредством длинных линий электропередачи, что повышает адекватность решений по оптимальному управлению нормальными режимами ЭС.

Для упрощения определения оптимальных коэффициентов трансформации для отдельных контуров ЭС согласно (8) целесообразно перейти к э.д.с. небаланса в относительных единицах (по отношению к напряжениям соответствующих базисных узлов):

$$\dot{\mathbf{E}}_{nb}^{opt} = j \dot{\mathbf{U}}_{bd}^{-1} (\dot{\mathbf{E}}_{nb,\gamma} \dot{\mathbf{U}}_b + \dot{\mathbf{Z}}_{f,ur} \mathbf{j}), \quad (10)$$

где $\dot{\mathbf{U}}_{bd}$ – диагональная матрица напряжений опорных узлов, размерность которой соответствует количеству независимых базисных контуров, а i -ый элемент соответствует значению напряжения j -го узла начала i -го независимого контура: $\dot{U}_{bd(i,i)} = \dot{U}_{b(j)}$.

Учитывая свойства описанной выше матрицы $\dot{\mathbf{U}}_{bd}$ выражение (10) можно подать в виде:

$$\dot{\mathbf{E}}_{nb}^{opt} = j(\dot{\mathbf{E}}_{nb,\gamma} \mathbf{1}_b + \dot{\mathbf{U}}_{bd}^{-1} \dot{\mathbf{Z}}_{f,ur} \mathbf{j}), \quad (11)$$

где $\mathbf{1}_b$ – единичный вектор столбец, размерность которого соответствует количеству опорных узлов системы независимых базисных контуров ЭС.

После разделения (11) на активную и реактивную составляющие:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{nb,a}^{opt} &= \mathbf{E}_{nb,\gamma}'' \mathbf{1}_b - \left[(\mathbf{U}_{bd}^{-1} \mathbf{Z}_{f,ur}' - \mathbf{U}_{bd}''^{-1} \mathbf{Z}_{f,ur}'') \mathbf{J}_r + (\mathbf{U}_{bd}^{-1} \mathbf{Z}_{f,ur}'' + \mathbf{U}_{bd}''^{-1} \mathbf{Z}_{f,ur}'') \mathbf{J}_a \right]; \\ \mathbf{E}_{nb,r}^{opt} &= -\mathbf{E}_{nb,\gamma}' \mathbf{1}_b + \left[(\mathbf{U}_{bd}^{-1} \mathbf{Z}_{f,ur}' + \mathbf{U}_{bd}''^{-1} \mathbf{Z}_{f,ur}'') \mathbf{J}_r - (\mathbf{U}_{bd}^{-1} \mathbf{Z}_{f,ur}'' - \mathbf{U}_{bd}''^{-1} \mathbf{Z}_{f,ur}'') \mathbf{J}_a \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

где $\mathbf{E}_{nb,\gamma}'$, $\mathbf{E}_{nb,\gamma}''$ – продольная и поперечная составляющие матрицы относительных контурных э.д.с. $\dot{\mathbf{E}}_{nb,\gamma}$, которая зависит от неоднородности электросетей электрической системы; $\mathbf{Z}_{f,ur}'$, $\mathbf{Z}_{f,ur}''$ – матрицы, соответственно, активных и реактивных составляющих контурных сопротивлений $\dot{\mathbf{Z}}_{f,ur}$, которые характеризуют зависимость уравнительных э.д.с. от неоднородности параметров ЭС.

После введения обозначений выражения (12) в критериальной форме примут вид

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{nb,a}^{opt} &= \mathbf{E}_{nb}'' + \pi_{a1}^J \mathbf{J}_{*a} + \pi_{a2}^J \mathbf{J}_{*r}, \\ \mathbf{E}_{nb,r}^{opt} &= -\mathbf{E}_{nb}' - \pi_{r1}^J \mathbf{J}_{*a} - \pi_{r2}^J \mathbf{J}_{*r}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $\mathbf{E}_{nb}' = \mathbf{E}_{nb,\gamma}' \mathbf{1}_b$; $\mathbf{E}_{nb}'' = \mathbf{E}_{nb,\gamma}'' \mathbf{1}_b$; π_{a1}^J , π_{a2}^J , π_{r1}^J , π_{r2}^J – матрицы критериев подобия, аналогичных по физическому смыслу критериям (2), которые определяются из следующих выражений:

$$\begin{aligned} \pi_{a1}^J &= - \left[\mathbf{E}_{nb,a}^{(6)} \right]_d^{-1} (\mathbf{U}_{bd}^{-1} \mathbf{Z}_{f,ur}' - \mathbf{U}_{bd}''^{-1} \mathbf{Z}_{f,ur}'') [\mathbf{J}_r^{(b)}]_d, \\ \pi_{a2}^J &= - \left[\mathbf{E}_{nb,a}^{(6)} \right]_d^{-1} (\mathbf{U}_{bd}^{-1} \mathbf{Z}_{f,ur}'' + \mathbf{U}_{bd}''^{-1} \mathbf{Z}_{f,ur}') [\mathbf{J}_a^{(b)}]_d, \\ \pi_{r1}^J &= - \left[\mathbf{E}_{nb,r}^{(6)} \right]_d^{-1} (\mathbf{U}_{bd}^{-1} \mathbf{Z}_{f,ur}' + \mathbf{U}_{bd}''^{-1} \mathbf{Z}_{f,ur}'') [\mathbf{J}_r^{(b)}]_d, \\ \pi_{r2}^J &= \left[\mathbf{E}_{nb,r}^{(6)} \right]_d^{-1} (\mathbf{U}_{bd}^{-1} \mathbf{Z}_{f,ur}'' - \mathbf{U}_{bd}''^{-1} \mathbf{Z}_{f,ur}') [\mathbf{J}_a^{(b)}]_d, \end{aligned} \quad (14)$$

где $\mathbf{E}_{nb,a}^{(b)}$, $\mathbf{E}_{nb,r}^{(b)}$ – контурные э.д.с. небаланса, определенные для базового режима ЭС (предварительно рассчитанного оптимального режима по критерию минимума потерь); $\mathbf{J}_{*a} = \mathbf{J}_a [\mathbf{J}_a^{(b)}]_d^{-1}$; $\mathbf{J}_{*r} = \mathbf{J}_r [\mathbf{J}_r^{(b)}]_d^{-1}$ – векторы относительных задающих токов в узлах ЭС для текущего режима; $\mathbf{J}_a^{(b)}$, $\mathbf{J}_r^{(b)}$ – векторы-столбцы активных и реактивных составляющих задающих токов в узлах для базового режима ЭС.

Используя соотношение между коэффициентами трансформации и э.д.с. небаланса в контуре ЭС (9) законы оптимального управления трансформаторами с продольно-поперечным регулированием примут вид:

$$\dot{\mathbf{k}}_{xx}^{opt} = \dot{\mathbf{k}}_{xx}^{opt} - \dot{\mathbf{K}}_{nb}^{-1} \left[(\delta_{a1}^J \mathbf{J}_{*a} + \delta_{a2}^J \mathbf{J}_{*r}) - j(\delta_{r1}^J \mathbf{J}_{*a} + \delta_{r2}^J \mathbf{J}_{*r}) \right], \quad (15)$$

где $\dot{\mathbf{k}}_{xx}^{opt}$ – вектор коэффициентов трансформации трансформаторов, которые обеспечивают оптимальность потоков мощности в независимых контурах ЭС по минимуму потерь при отсутствии нагрузок (в режиме холостого хода); $\dot{\mathbf{K}}_{nb}$ – диагональная матрица небалансов коэффициентов трансформации трансформаторов ЭС, размещенных в дереве схемы замещения, а также коэффициентов распространения волны длинных линий электропередачи.

Законы управления (15) положены в основу функционирования системы автоматического управления [5, 10]. Как видно из (14), (15) они определяются неоднородностью, степенью несбалансированности коэффициентов трансформации трансформаторов ЭС, а также несоответствием волновых характеристик длинных линий электропередачи. Их реализация компенсирует с точностью до степени регулирования коэффициентов трансформации неоптимальность потораспределения в ЭС и приближает потери мощности в ЭС к минимальным.

3. 2. Реализация системы автоматического управления потоками мощности в ЭС с децентрализацией функций реального времени

Для реализации системы автоматизированного управления потоками мощности и напряжением в электрических сетях, которая бы обеспечивала возможности оперативного управления согласно (14), (15), целесообразно использовать классическую двухконтурную схему [5, 6] с децентрализацией функций реального времени. На первом этапе (в контуре централизованного управления) определяются причины неоптимальности функционирования ЭС и перечень доступных регулирующих устройств. Для этого выполняется ретроспективный анализ результатов управления режимами на основании краткосрочного планирования, а также оцениваются показатели неоднородности ЭС. Далее, используя полную информацию о параметрах ЭС, определяются и корректируются матрицы условно-постоянных параметров, которые входят в (20). С использованием разработанных [5, 6] математических моделей осуществляется адаптация законов управления к реальным условиям функционирования регулирующих устройств, выполняется ранжирование регулирующих устройств по приоритету управления с учетом надежности и ресурса устройств РПН. Определяются зоны нечувствительности локальных систем управления регулируемыми устройствами, что позволяет установить рациональную интенсивность переключений для каждого трансформатора и скоординировать их работу в процессе оперативного управления так, чтобы снижение потерь мощности достигалось за счет минимального количества переключений.

На втором этапе (в контуре локального управления) полученные математические модели используются для определения расчетного значения управляющих воздействий (15) и принятия решения относительно целесообразности их реализации. Управление в темпе процесса осуществляется только в контуре оперативного управления. Во внешнем контуре, при необходимости, может осуществляться коррекция пассивных параметров ЭС для (15). Однако, такое изменение чаще осуществляется на стадии краткосрочного планирования режимов, после существенных изменений нагрузок, или значительных отклонений параметров регулирующих устройств от плановых [6].

Подобная схема реализации системы управления позволяет обеспечить децентрализацию части информационных функций без потери преимуществ централизованного управления, поскольку на протяжении основного времени (режимы нормальной эксплуатации ЭС) регулирование параметров трансформаторов

осуществляется на основании локальных параметров, обеспечивая условный оптимум общесистемного критерия оптимальности [5, 10]. Отклонение пассивных параметров ЭС или параметров режима контролируется централизованно и в случае необходимости корректируются отдельные параметры моделей (14) и (15). Таким образом, по сути, реализуется централизованное оперативное управление режимами ЭС с помощью децентрализованных подсистем – локальных регулирующих устройств на отдельных трансформаторных подстанциях (электрических станциях).

Автоматическое управление регулируемыми устройствами ЭС и согласование управляющих воздействий с оперативным управлением выполняется с использованием микропроцессорного устройства автоматического контроля и управление функционированием (АККФ) РУ [10]. Применение устройства, позволяет ввести в систему управления нормальными режимами ЭС обратные связи, контролировать выполнение управляющих воздействий и оценивать эффективность управления, как отдельными трансформаторами, так и электрическими сетями в целом. Последнее дает возможность автоматизировать ряд функций оперативного управления и повысить эффективность использования РУ трансформаторов в задачах уменьшения потерь активной мощности в электрической системе.

3. 3. Анализ эффективности оптимального управления потоками мощности в электрических сетях

Для анализа эффективности предложенного метода определения оптимальных управляющих воздействий для коррекции потоков мощности в электрических сетях с дальними электропередачами был проведен эксперимент на примере схемы ЭС 110–750 кВ Юго-Западной электроэнергетической системы (ЮЗЭС). Схема содержит 32 узла, 38 ветвей (из которых 5 – линии 750 кВ, и 14 – линии 330 кВ), 10 трансформаторов связи. Целью эксперимента было оценивание влияния допущений в модели уравнительных э.д.с. на оптимальность потоков мощности в электрических сетях, которые корректируются изменением комплексных коэффициентов трансформации регулирующих устройств.

Для сравнения были рассчитаны оптимальные управляющие воздействия для регулирующих трансформаторов исследуемой ЭС по известным выражениям (1), (2) и методике, описанной в [10]. Согласно данной методике все пассивные параметры ЭС приводятся к базисному напряжению, за счет чего электрические сети энергосистем могут рассматриваться как сети одного класса напряжения. Кроме того поперечные параметры схемы замещения ЭС предварительно эквивалентируются в нагрузки ЭС с последующим перерасчетом в задающие токи. Дальние электропередачи представляются в матрицах сосредоточенными параметрами, определенными с учетом поправочных коэффициентов. Результаты определения потерь мощности в характерных режимах ЭС после реализации полученных управляющих воздействий приведены в табл. 1.

Аналогичные расчеты по определению оптимальных коэффициентов трансформации трансформаторов с учетом влияния дальних электропередач выпол-

нены в соответствии с предложенным методом (14), (15). Из анализа результатов (табл. 1) видно, что метод определения критериев подобия с приведением пассивных параметров ЭС к базисному напряжению (2) с точки зрения уменьшения потерь мощности является менее эффективным, чем разработанный метод (15). Особенно это касается состояний ЭС, когда коэффициенты трансформации трансформаторов далеки от средненоминальных.

Таблица 1

Сравнение результатов оптимизации потоков мощности для примера ЭС 110-750 кВ Юго-Западной электроэнергетической системы

Параметр	Режим		
	I	II	III
Потери мощности в исходном состоянии ΔP , МВт	31.04	49.28	80.67
Метод оптимизации потокораспределения в ЭС с учетом влияния дальних электропередач			
Потери мощности в оптимальном состоянии $\Delta P_{\text{опт}}$, МВт	29.44	43.76	71.19
Снижение потерь мощности $d\Delta P$, МВт / %	$\frac{1.58}{5.1}$	$\frac{5.52}{11.2}$	$\frac{9.48}{11.8}$
Суммарное количество переключений РПН n	12	6	24
Средняя эффективность одного переключения РПН $d\Delta P/n$, МВт/переключение	0.13	0.92	0.39
Метод оптимизации потокораспределения в ЭС с приведением параметров ЭС к базисному напряжению			
Потери мощности в оптимальном состоянии $\Delta P_{\text{опт}}$, МВт	29.9	44.97	72.15
Снижение потерь мощности $d\Delta P$, МВт / %	$\frac{1.14}{3.7}$	$\frac{4.31}{8.7}$	$\frac{8.62}{10.6}$
Суммарное количество переключений РПН n	10	4	21
Средняя эффективность одного переключения РПН $d\Delta P/n$, МВт/переключение	0.11	1.07	0.41
Минимально возможные потери мощности ΔP_{min} , МВт	28.32	39.47	56.75

Преимущество разработанного метода формирования законов управления состоит в учете контурных э. д. с., вызванных несбалансированными коэффициентами трансформации и разбалансированными коэффициентами распространения волны длинных линий электропередач. Указанные факторы в некоторых случаях могут увеличивать уравнивающие э. д. с.,

что необходимо учитывать в процессе оптимального управления.

Вместе с тем, за счет компенсации только одной составляющей уравнивающих э. д. с., вызванной неоднородностью продольных параметров ЭС, законы управления, сформированные по методу приведения параметров к базисному напряжению [10], обеспечивают более шадящее использование ресурса регулирующих устройств. Последнее, в некоторых случаях, может приводить к повышению эффективности использования трансформаторов и автотрансформаторов с РПН.

4. Выводы

В работе получено новое решение актуальной научно-прикладной задачи повышения эффективности функционирования неоднородных электросетей с дальними электропередачами, которое состоит в разработке метода определения оптимальных режимов таких сетей, реализация которых позволяет посредством управляющих воздействий уменьшать технологические потери электроэнергии и повышать ее качество в электрических системах.

1. Электрические системы не являются оптимальными с точки зрения расходов электроэнергии при ее производстве, транспортировке и распределении. Одной из основных причин неоптимальности состояний ЭС является их неоднородность. В работе приведены результаты усовершенствования метода оптимизации потоков мощности в электрических сетях с дальними линиями электропередачи. На основании приведенной математической модели неоднородности электрических сетей с учетом особенностей функционирования дальних линий электропередач показано, что для таких сетей из-за нестабильности продольных и поперечных параметров практически не может быть обеспечено их однородное состояние. Таким образом, обеспечение оптимальности их режимов требует применения соответствующих систем автоматического управления.

2. Для решения задачи определения законов оптимального управления трансформаторами связи ЭС была предложена математическая модель оптимальных э. д. с. небаланса, а также метод определения оптимальных коэффициентов трансформации регулирующих устройств с учетом волновых свойств дальних электропередач, а также влияния несбалансированных коэффициентов трансформации трансформаторов связи и регулирования напряжений в центрах питания ЭС. Такое усовершенствование позволяет принимать более эффективные решения в задачах оптимального управления потоками мощности и напряжением в ЭС.

Литература

1. Стогній, Б. С. Основні параметри енергозабезпечення національної економіки на період до 2020 року [Текст] / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, А. В. Праховник, С. П. Денисюк. – К.: Видавництво Інституту електродинаміки НАН України, 2011. – 275 с.
2. Terzija, V. Wide-Area Monitoring, Protection and Control of Future Electric Power Networks [Text] / V. Terzija, V. Valverde, G. Deyu Cai, P. Regulski, V. Madani, J. Fitch, S. Skok, M. M. Begovic, A. Phadke // Proceedings of the IEEE. – 2011. – Vol. 99, Issue 1. – P. 80–93. doi:10.1109/jproc.2010.2060450

3. Jakushokas, R. Power Network Optimization Based on Link Breaking Methodology [Text] / R. Jakushokas, E. G. Friedman // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. – 2013. – Vol. 21, Issue 5. – P. 983–987. doi:10.1109/tvlsi.2012.2201186
4. Холмский, В. Г. Оптимизация потокораспределения в замкнутых электрических сетях с высокой степенью неоднородности [Текст] / В. Г. Холмский // Электричество. – 1965. – № 9. – С. 16–21.
5. Лежнюк, П. Д. Моделивання впливу неоднорідності електричної системи на оптимальність її режиму [Текст] / П. Д. Лежнюк, Д. І. Оболонський, Л. Р. Пауткіна // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1996. – № 4. – С. 44–49.
6. Лежнюк, П. Д. Моделирование компенсации влияния неоднородности электрических сетей на экономичность их режимов [Текст] / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, Д. І. Оболонський // Электричество. – 2007. – № 11. – С. 2–8.
7. Веников, В. А. Дальние электропередачи переменного и постоянного тока [Текст] / В. А. Веников, Ю. П. Рыжов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 272 с.
8. Кулик, В. В. Комбіновані моделі нормальних режимів електричних систем з урахуванням особливостей довгих ліній електропередачі [Електронний ресурс] / В. В. Кулик, С. Я. Вишневський // Наукові праці ВНТУ. – 2012. – № 1. – Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2012_1/2012-1.files/uk/12vkvkltl_ua.pdf.
9. Сулейманов, В. М. Електричні мережі та системи [Текст] / В. М. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе. – К.: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 2008. – 504 с.
10. Лежнюк, П. Д. Реалізація контролю і керування функціонуванням трансформаторів в електроенергетичних системах [Текст] / П. Д. Лежнюк, К. І. Кравцов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 6. – С. 84 – 86. – ISSN 1997-9274.

Розглянуто рішення проблеми нестабільних параметрів вихідної напруги вітроелектростанцій через непостійність вітрового потоку, які обмежують область їх використання, на основі переходу до розробки пневмоелектростанцій, яка містить у своїй структурі акумулятори енергії у вигляді ємностей стисненого повітря високого тиску. Запропонована конкретна розробка пневмоелектростанції малої потужності. Пророблене питання розрахунку та вибору розмірів акумуляторів енергії у вигляді ємностей високого тиску, з урахуванням наявності визначених інтервалів вітрового потоку

Ключові слова: вітроелектростанція, пневмоелектростанція, акумулятор енергії, стиснене повітря, тиск, потужність, ємність, електроенергія

Рассмотрено решение проблемы нестабильных параметров выходного напряжения ветроэлектростанций из-за непостоянства ветрового потока, ограничивающих область их применения, на основе перехода к разработке пневмоэлектростанции, содержащей в своей структуре аккумуляторы энергии в виде емкостей сжатого воздуха высокого давления. Предложена конкретная разработка пневмоэлектростанции малой мощности. Проработан вопрос расчета и выбора размеров аккумуляторов энергии в виде емкостей высокого давления, с учетом наличия определенных интервалов ветрового потока

Ключевые слова: ветроэлектростанция, пневмоэлектростанция, аккумулятор энергии, сжатый воздух, давление, мощность, скорость, время, емкость, электроэнергия

УДК 621.311

ПНЕВМОЭЛЕКТРО- СТАНЦИЯ КАК АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ИСТОЧНИК ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОЙ БЫТОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В. О. Квашнин

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра "Электромеханические
системы автоматизации"

Донбасская государственная
машиностроительная академия
ул. Шакинова, 72, г. Краматорск,
Донецкая обл., Украина, 84313
E-mail: v.kvashnin@mail.ru

В. В. Квашнин

Кафедра физики неравновесных процессов,
метрологии и экологии
Донецкий национальный университет
пр. Гурова, 14, г. Донецк, Украина, 83001
E-mail: Vladyslav_VK@i.ua

1. Введение

Во всех индустриально развитых странах, особенно там, где относительно мало собственных углеводородов, альтернативные технологии получения

электроэнергии имеют стратегическое значение для развития как промышленности, так и макроэкономики в целом [1].

Одним из наиболее перспективных направлений альтернативной энергетики является ветроэнергети-