

ФОРМИРОВАНИЕ ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПО КРИТЕРИЮ ТОЧНОСТИ

Сокол Е. И.¹, Гриб О. Г.¹, Швец С. В.²

¹Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт",

²Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова

Для сокращения объема вычислений и оперативности принятия решений предложены правила отсева вариантов сетевых систем оперативного обслуживания энергосистемы по критерию точности.

Постановка проблемы. Глобализационные аспекты развития электроэнергетики Украины в условиях интеграции топливно-энергетического комплекса нашей страны в мировую экономику, а также расширение торговли электроэнергией, произведенной разными типами электростанций, оказание атомно-строительных услуг и других операций на международных энергетических рынках, требуют трансформации электроэнергетической системы в соответствии с общемировыми тенденциями расширения сфер извлечения прибыли и наращивания добавленной стоимости [1,2]. Основа этих технологий – концепция "интеллектуальной энергетики" Smart Grid и сетевое управление [3-5].

Технологической базой для этой глобализационной трансформации является инфраструктура производства и сбыта атомно-энергетических ресурсов, ядро которой составляет энергосистема. Развитие энергосистемы должно опираться на соответствующие изменения организационной структуры, бизнес-моделей и иных аспектов управления в НЭК "Укрэнерго"[6].

Современная модернизация ключевых составляющих энергосистемы должна обеспечивать их надежную и экономичную работу и требует эффективного решения целого комплекса оптимизационных задач структурного и управленческого синтеза, неразрывно связанного со стратегией обслуживания энергосистемы в целом.

Анализ последних исследований и публикаций. Существует несколько подходов к построению сетевых систем управления в энергетике. Суть первого подхода заключается в том, что сетевая система должна обладать тремя взаимосвязанными типовыми подсистемами [7]:

- информационной подсистемы, содержащей активные и пассивные технические средства, обеспечивающие сбор достоверной информации о текущем состоянии энергосистемы и окружающей среды;
- подсистемы активных технических средств, обеспечивающих реализацию команд от информационной подсистемы;
- подсистемы информационно-управляющих средств, реализующих анализ и управление первыми двумя подсистемами.

Такая организация реализует распределенную систему с удаленным центром управления.

Одна из основных проблем математического и алгоритмического описания сетевых систем в том, что динамика показателей моделируется в непре-

рывном времени, а динамика действий – в дискретном. Другой особенностью рассматриваемых систем является то, что они характеризуются большим количеством компонентов и причинно-следственных связей [8]. Внешняя среда в реальных задачах обычно характеризуется как стохастическая.

Отметим, что сетевые технологии – это не только информатизация процесса, но и возможность прогноза ситуации, а также принятия опережающих действий.

Второй подход для реализации сетевых систем управления в электроэнергетике – создание информационных систем на базе мультиагентных технологий [8].

Наиболее перспективным направлением оптимизации энергосистем принят комплексный подход, сочетающий в себе свойства мультиагентных технологий и распределенных систем на основе концепции "интеллектуальной энергетики" в условиях сетевого взаимодействия.

Таким образом, необходимо специальное теоретико-методологическое исследование проблем формирования и реализации модели превращения энергосистемы в универсального энергооператора на основе управления сетевым характером.

Цель статьи. Разработка правил отсева вариантов структуры системы оперативного обслуживания энергосистемы по критерию точности.

Основные материалы исследований. В последнее десятилетие в передовых странах мира развиваются технологии "интеллектуальных сетей", которые рассматриваются как основа модернизации и инновационного развития электроэнергетики.

Новейшие технологии, применяемые в энергосистемах, основанные на адаптации характеристик оборудования в зависимости от режимной ситуации, активное взаимодействие с генерацией и потребителями позволяют создавать эффективно функционирующую систему, в которую встраиваются современные информационно-диагностические системы, системы автоматизации управления всеми элементами, включенными в процессы производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии [9].

Энергосистема из пассивного устройства передачи и распределения электроэнергии превращается в активный элемент, параметры и характеристики которой изменяются в зависимости от требований режимов работы в реальном времени. Сети оснащаются современными системами автоматизации управления нормальными и аварийными режимами работы, используются мощные компьютерные средства для

управления и оценки состояния режимов работы [10].

Для реализации этой новой функции энергосистема оснащается цифровыми системами оперативно-го обслуживания, ориентированными на внедрение сетевидного принципа управления [6]. Подобная организация управления обеспечивает получение информации в режиме on-line о режимах работы энергосистемы и состоянии оборудования.

Смысл сетевидного принципа состоит в том, что главным элементом всей энергосистемы является "обмен информацией" с максимальным расширением форм производства этой информации, доступа к ней, ее распределения, обратной связи. Энергосистема, в широком понимании, представляет собой новое информационное пространство, в котором разворачиваются основные стратегические процессы, а также их техническое и экономическое обеспечение.

Для достижения целей энергоэффективности, снижения потерь, помимо применения современного экономичного оборудования и технологий используются и специфические средства визуального контроля и обеспечения безопасной эксплуатации энергосистем, такие как беспилотный летательный аппарат (БПЛА) [6].

Основное предназначение БПЛА – тепловизионное обследование электрооборудования цифровых подстанций и элементов линий электропередачи для выявления дефектов контактных соединений, оборудования, перегрузки кабелей и автоматических выключателей, коррозии изоляции и других дефектов, возникающих вследствие перегрева электрического оборудования и узлов. Тепловизионное обследование позволяет выявить наличие дефектов и зафиксировать его точное месторасположение на термограмме.

Тепловизионный метод диагностики имеет ряд неоспоримых достоинств и преимуществ по сравнению с традиционными методами диагностики электрооборудования:

- это метод бесконтактного, неразрушающего контроля, обследование проводится под рабочей нагрузкой и не требует отключения оборудования, которое ведет к серьезным финансовым потерям (неинвазивный метод);

- дистанционность метода позволяет не только контролировать труднодоступные дефекты (например, контроль оборудования находящегося на высоте) без предварительной подготовки электрооборудования, но и является гарантом безопасности при проведении обследования;

- с помощью тепловизионного обследования выявляются не только застарелые и предаварийные дефекты, но и дефекты, только зарождающиеся или находящиеся на самых ранних стадиях развития, а также, дефекты которые невозможно определить никаким иным методом;

- оперативность (отображение результатов в реальном времени), достоверность, объективность, точность получаемых сведений, безопасность (при проведении обследования оборудования не оказывает воздействия).

Дефекты контактных соединений электрооборудования приводят к перегреву, преждевременному износу, а также увеличивают риск возникновения

аварии.

Тепловизионное обследование позволяет выявить следующие виды дефектов:

- дефекты контактных соединений электрооборудования;
- перегрузка электрооборудования по сравнению с допустимыми значениями;
- дефекты изоляции;
- дефекты оборудования, возникающие при перегреве оборудования.

Экономический эффект от проведения тепловизионного обследования не оспорим, так как:

- своевременное обследование позволяет выявить дефекты электрооборудования на ранних стадиях и предотвратить аварийные ситуации, которые влекут за собой существенные финансовые, трудовые и материальные затраты, на проведение ремонта и восстановления работоспособности оборудования, что позволяет говорить о быстрой окупаемости метода;

- наличие БПЛА позволяет иметь эффективную систему оперативного контроля энергосистемы без затрат на дополнительное оборудование, т. е. исключает его избыточность.

Эффективное применение системы оперативного обслуживания энергосистемы (СОЭ), построенной на принципах сетевидности [6], зависит от точности выполняемых диагностических операций как с помощью БПЛА, так и с помощью цифровых средств СОЭ.

По результатам диагностических измерений изменяется конфигурация энергосистемы и ее режимы, часть оборудования выводится в планово-профилактический ремонт, происходит ликвидация последствий аварийных режимов. В этом случае можно говорить о разных вариантах построения энергосистемы и ее СОЭ.

Эффективная эксплуатация энергосистемы должна основываться на решении задач оптимизации, связанных с оценкой и перебором вариантов построения энергосистемы и ее СОЭ. Среди критериев отсева вариантов структуры СОЭ предлагается использовать точностной критерий.

Обозначим через $p_{il(\zeta_l)} = \{p_q^0 \pm \Delta p_q \quad \forall q \in J_{il(\zeta_l)}\}$ вектор параметров размерности $q_{il(\zeta_l)}$, соответствующий элементам технической реализации множества $J_{il(\zeta_l)}$ для закона управления $u_{il(\zeta_l)}$. Решение системы дифференциальных уравнений для l -й подсистемы i -го уровня запишем в виде:

$$y_{il}^j(t, v_j^i) = F_{il(\zeta_l)}^j(u_{il(\zeta_l)}(t), p_{il(\zeta_l)}, y_{il(0)}^j), \quad (1)$$

$$(k \in K_{il}, \quad q \in I_{i-k}^l),$$

где через v_j^i обозначена часть варианта $v_j \in V$, от которого зависит значение выходной переменной l -й подсистемы i -го уровня;

$y_{il(0)}^{j\alpha} = y_{i-k,q}^{l\alpha}(t_i) (k \in K_{il})$ – начальные условия для дифференциальных уравнений, являющиеся значениями выходных переменных подсистемы $i-k$ -х уровней $\forall k \in K_{il}$, связанных с l -й подсистемой i -го

уровня $(\alpha = 1, \dots, \alpha_{il}^j)$;

$F_{il(\zeta_i)}^j$ – векторная функция, компоненты которой есть непрерывные функции своих аргументов.

Предположим также, что компоненты векторной функции $F_{il(\zeta_i)}^j$ имеют отличные от нуля первые производные в некоторой окрестности точки $(y_{i-k}^l(t_i), P_{il(\zeta_i)(0)})$, определяемой номинальными значениями параметров и начальных условий. Необходимо из множества возможных вариантов создания сложной системы СОЭ $v_j \in V$, которые характеризуются как видами законов управления в каждой из подсистем, так и погрешностями элементов технической реализации, отобрать такие, которые удовлетворяют критерию:

$$\Delta y_{nh}^{h\alpha}(v_i) \leq \varepsilon_{nh}^{h\alpha}, \quad (h \in I_n, \alpha = 1, \dots, \alpha_{nh}^h), \quad (2)$$

где $\varepsilon_{nh}^{h\alpha}$ – неотрицательная величина, характеризующая степень близости α -й выходной координаты h -й подсистемы n -го уровня СОЭ и ее программного значения;

$\Delta y_{nh}^{h\alpha}(v_i)$ – точностная характеристика выходной переменной подсистемы n -го уровня СОЭ.

Непосредственное построение всех вариантов множества V с оценкой их по точностному критерию (2) приводит к необходимости интегрировать систему дифференциальных уравнений для всех подсистем. Это связано с большим объемом вычислений, что не позволяет выбрать приемлемый вариант СОЭ в заданные сроки. В связи с этим возникает необходимость разработки правил отсева как видов законов управления, так и элементов их технической реализации, которые заведомо не смогут входить в приемлемый вариант СОЭ.

Выражение (2) описывает совокупность общих требований на всю систему в целом. В связи с этим необходимо провести декомпозицию этих требований относительно каждой из подсистем и привести их к виду:

$$\Delta y_{il}^{j\alpha} = \left| y_{il}^{j\alpha}(v_j^i) \Big|_{t_{i+1}} - y_{il(0)}^{j\alpha}(t+1) \right| \leq \varepsilon_{il}^{j\alpha}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{il}^{j\alpha}$ – степень близости α -й компоненты выходной переменной l -й подсистемы i -го уровня;

$y_{il}^{j\alpha}(v_j^i) \Big|_{t_{i+1}}$ – определяется из уравнений, описывающих поведение l -й подсистемы i -го уровня.

Для выполнения такой декомпозиции получены соотношения, связывающие точность функционирования отдельной подсистемы СОЭ с вариациями параметров различных законов управления, а также с точностными характеристиками подсистем нижних уровней, влияющих на эту подсистему. Эта связь определяется принадлежностью допустимых отклоне-

ний вектора параметров и начальных условий от номинальных значений области

$$D_{il(\zeta_i)} = \bigcap_{\alpha=1}^{\alpha_{il}^j} D_{il(\zeta_i)}^{\alpha}, \quad (4)$$

где $D_{il(\zeta_i)}^{\alpha}$ – выпуклая область полупространства отклонений вектора параметров $\Delta p_{il(\zeta_i)}^q$ и $\Delta y_{i-k,q}^p$ начальных условий, образованная пересечением двух полупространств, нормированных с использованием функций чувствительности выходных переменных по параметрам и начальным условиям в номинальных точках.

При построении алгоритма предварительного отсева вариантов проектируемой СОЭ необходимо учитывать следующие утверждения (приводятся без доказательства).

Первое. Если закон управления $u_{i-k,q(\zeta_i)}$ q -й подсистемы $i-k$ -го уровня при номинальных значениях параметров приводит к таким вариациям выходных переменных $\Delta y_{i-k(\zeta_i)}^l$, которые не принадлежат области $D_{il}^{(0)} = \bigcup_{\zeta_i=1}^{\xi_{il}} D_{il(\zeta_i)}$ при минимальных вариациях параметров законов управления $u_{il(\zeta_i)} \in U_{il}$, т.е.

$$\Delta y_{i-k(\zeta_i)}^l \notin D_{il}^{(0)} = \bigcup_{\zeta_i=1}^{\xi_{il}} D_{il(\zeta_i)} \Big|_{\Delta p_{il(\zeta_i)}^{\min}}, \quad (5)$$

то он не будет образовывать вариантов системы СОЭ с законами управления из множества U_{il} , удовлетворяющими неравенству (2). Отсев вариантов подсистем $i-k$ -го уровня $\forall k \in K_{il}$ при проверке условия (5) позволяет получить максимальное число принципиально возможных вариантов их создания за счет сужения множества вариантов технической реализации l -й подсистемы i -го уровня СОЭ.

Второе. Если вектор погрешностей параметров $\Delta p(v_{il(\zeta,\mu)}) = \{\Delta p_{il(\zeta)}\}$ ($q \in J_{il(\zeta)}$) какого-либо варианта технической реализации $v_{il(\zeta,\mu)}$, соответствующий закону управления $u_{il(\zeta)}$ в l -й подсистеме, не принадлежит области $D_{il(\zeta)}^{\min}$ при вариациях начальных условий

$$\Delta y_{il}^{j\lambda(m)} = \Delta y_{i-k,q}^{l\alpha(m)} = \min_{\zeta} \{ \Delta y_{i-k,q}^{l\alpha} \} \\ (k \in K_{il}, q \in I_{i-k}, \alpha = 1, \dots, \alpha_{il}^j),$$

$$\text{т.е. } \Delta p(v_{il(\zeta,\mu)}) \notin D_{il(\zeta)}^{\min} = D_{il(\zeta)} \Big|_{\Delta y_{il}^{j\lambda} = \Delta y_{il}^{j\lambda(m)}}, \quad (6)$$

то ни с каким законом управления $u_{i-k,q(\zeta)} \in U_{i-k,q}$ ($\zeta = 1, \dots, \xi_{i-k,q}$) он не будет образовывать вариант системы, удовлетворяющий ограничениям (3).

Отсев вариантов технической реализации подсистемы i -го уровня при проверке условия (6) позволяет получить максимально возможное число вариантов их построения за счет сужения множества вариантов подсистемы $i-k$ -го уровня $\forall k \in K_{il}$.

Третье. Для любых $\Delta y_{i-k,q}^l \in D_{il}^{(0)}$, ($k \in K_{il}, q \in I_{i-k}^l$) области допустимых вариаций параметров $D_{il}^{\min}(\zeta_i = 1, \dots, \xi_{il})$ определяют все варианты технической реализации СОЭ законов управления из U_{il} , обеспечивающие выполнение (3).

Через $D_{il}^{(0)}$ и $D_{il}^{\min}(\zeta_i)$ обозначены области допустимых вариаций начальных условий и параметров, получаемые из D_{il} соответственно при нулевых вариациях параметров $\Delta p_{il}^q(\zeta_i)$ и минимальных вариациях начальных условий $\Delta y_{i-k,q}^{l(m)}$ ($k \in K_{il}, q \in I_{i-k}^l$).

Выводы. С применением в энергосистемах технологий "интеллектуальных сетей" и оснащением современными системами автоматизации управления нормальными и аварийными режимами работы, они ориентированы на внедрение сетецентрической концепции управления. Применение цифровых средств контроля подсистем энергосистемы в совокупности с БПЛА позволяет эффективно устранять аварийные ситуации и дефекты электрооборудования, а также осуществлять постоянный информационный обмен между взаимосвязанными элементами единой системы. По результатам диагностических измерений изменяется конфигурация энергосистемы, позволяет говорить о разных вариантах построения энергосистемы и ее СОЭ. Среди критериев отсева вариантов структуры СОЭ предлагается использовать метод последовательного анализа вариантов и оценки сложной системы по критерию точности. Суть метода сводится к последовательному построению выпуклых областей допустимых вариаций параметров и начальных условий каждой из подсистем, описываемые системой линейных неравенств, а затем к этим неравенствам применяются процедуры отсева в виде правил.

Список использованных источников

1. Петров Д. В. Мирохозяйственная адаптация организационных механизмов инвестиционного стимулирования модернизационных программ // Экономика. Право. Печать: Вестник КСЭИ. 2014. № 1 (61). – С. 226-231.
2. Апканеев А. В., Логинов Е. Л. Стратегические направления совершенствования системы управления предприятиями атомной отрасли // Вестник экономической интеграции. 2010. № 7. – С. 47-52.
3. Логинов Е. Л., Деркач Н. Л., Логинов А. Е. "Интеллектуальные сети" (smart grid) в электроэнергетике: проблемы управления и безопасности // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2011. № 20. – С. 49-55.
4. Байтов А. В. Сетецентрическое управление энергоинфраструктурными узлами с ключевым положением АЭС в глобальной энергетике //

Национальные интересы: приоритеты и безопасность, 2013, №30. – С. 2-10.

5. Массель Л. В., Иванов Р. А., Массель А. Г. Моделирование этапов принятия решений на основе сетецентрического подхода / Вестник ИрГТУ. – №10 (81). – 2013. – С. 16-22.

6. Сокол Е. И., Гриб О. Г., Швець С. В. Структурно-параметрическая организация элементов энергосистемы в условиях сетецентризма // Электротехника і електромеханіка. – 2016. – №2. – С. 61-64. doi: 10.20998/2074-272X.2016.2.11

7. Шабунин, А. Б. и др. Сетецентрический подход к разработке системы управления производственными процессами // Труды международной научно-практической конференции "Управление большими системами-2011" (УБС'2011). Т.3. – М.: ИПУ РАН, 2011. – С. 222-225.

8. Иващенко А. В. и др. Мультиагентные технологии для разработки сетецентрических систем управления // Известия Южного федерального университета. Технические науки. Выпуск № 3. Т. 116. – 2011. – С. 11-22.

9. Швець С. В. Застосування стратегії "кінцевого ефекту" в задачах оптимізації технічних систем/ Науково-технічний журнал "Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК". – № 1(3). – Харків: Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, 2015. – С. 18-19.

10. Швець С. В. Адаптаційні аспекти синтезу оперативно-диспетчерської служби/ Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Випуск 164 "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України". – Харків: ХНТУСГ, 2015. – С. 23-24.

Анотація

ФОРМУВАННЯ ОБСЛУГОВУВАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМИ ЗА КРИТЕРІЄМ ТОЧНОСТІ

Сокол Є. І., Гриб О. Г., Швець С. В.

Для скорочення обсягу обчислень та оперативності прийняття рішень запропоновано правила відсіву варіантів сетецентричної системи оперативного обслуговування енергосистеми за критерієм точності.

Abstract

THE FORMATION OF THE MAINTENANCE OF THE POWER SYSTEM BY THE CRITERION OF ACCURACY

Ye. Sokol, O. Gryb, S. Shvets

To reduce the amount of calculation and timeliness of decision-making proposed rules for dropout variants of network-centric system operational services of the power system by the criterion of accuracy.