

ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЛЭП С УЧЕТОМ ПОТЕРЬ НА КОРОНУ

Т.А. Дорогокупля, Б.Г. Булатов

Рассмотрен алгоритм управления режимом напряжением с учетом погодных условий, основанный на использовании синхронизированных векторных измерений по концам передачи, оценке баланса мощности и идентификации активной проводимости схемы замещения. Результаты оптимизации цифрового «двойника» могут использоваться в режиме советчика или в контуре регулирования. Приведены оценки ожидаемой экономии на потерях.

Ключевые слова: передача энергии, потери на корону, цифровой двойник, синхронизированные векторные измерения.

Современные тенденции мирового развития направлены на создание информационного общества. Новый проект «Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы» является долгосрочной программой, которая включает в себя множество сфер и об-

ластей российской экономики. Постановление правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р утвердило программу «Цифровая экономика Российской Федерации». Одной из целей программы является разработка генеральной схемы развития системы хранения и обработки данных, учитывающая планы развития энергетической и телекоммуникационной инфраструктуры.

Одним из реальных и эффективных способов достижения этой цели является цифровое управление в энергетике, которое развивается сегодня в направлении создания цифровых подстанций, внедрения синхронизированных векторных измерений, разработки оборудования и систем управления электрическими сетями с активно-адаптивными элементами. Цифровое управление основано на достоверных данных телеметрии о состоянии оборудования сети и параметрах режима его эксплуатации. Одним из путей усовершенствования технологий и повышения точности измерения являются синхронизированные векторные измерения (СВИ). Сегодня СВИ позволяют осуществлять мониторинг устойчивости системы и могут использоваться также для решения проблемы энергосбережения, например, в линиях электропередачи (ЛЭП) высокого (110–220 кВ) и сверхвысокого (330–750 кВ) напряжений с учетом влияния погодных условий на потери при коронировании.

Среднегодовые потери на корону в ЛЭП напряжением 220 кВ и выше составляют более 30 % от общих потерь, а при дожде, изморози и снеге могут возрастать более чем на порядок. Интенсивность короны зависит от рабочего напряжения. Оценка потерь по квадратичной зависимости от напряжения, принятая ранее, дает заниженные значения по сравнению с реальными потерями. В работах [1], [2] предлагается использовать пятую степень. Поскольку погодные условия при короне весьма неоднозначны и не поддаются прогнозированию, постольку эффективное снижение потерь на корону может достигаться только в режиме реального времени.

Для создания цифровой модели передачи использована программная среда LabVIEW. В качестве виртуального объекта рассматривается действующая ЛЭП 500 кВ Златоуст–Челябинская протяженностью 120,2 км, выполненная проводом ЗхАС-500/64. Расчет режима проводится по П-образной схеме замещения, в которой активная проводимость меняется в зависимости от рассматриваемых погодных условий. По концам передачи установлены устройства СВИ, замеряющие значения векторов токов и напряжений I_1 , U_1 , I_2 , U_2 , синхронизированных относительно U_1 . Эти СВИ поступают на вход цифрового «двойника», где используются для идентификации потерь на корону и соответствующей проводимости. Затем скорректированная схема замещения используется для одномерной оптимизации уровня напряжения в начале передачи. Найденное оптимальное напряжение поступает на рабочую станцию для информации оперативного персонала и может устанавливаться вручную на устройстве регулирования или включаться в контур автоматического управления (рис. 1).

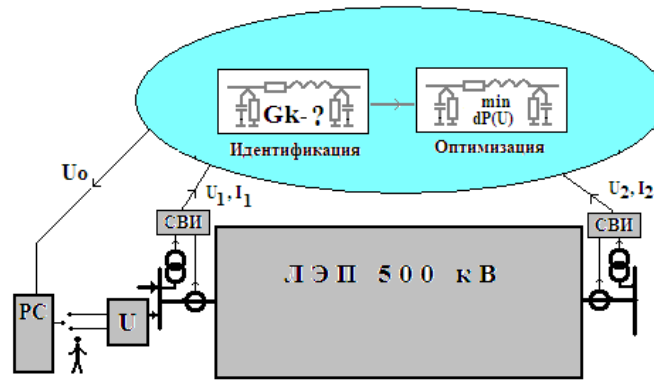


Рис. 1. Модель оптимизации режима

Рассмотрим основные элементы алгоритма реализации цифровой модели в программной среде LabVIEW.

Алгоритм расчета режима ЛЭП 500 кВ строится в соответствии с формулами расчета звена передачи при заданных P_1 , Q_1 и U_1 . При этом принято, что потери на корону пропорциональны напряжению в пятой степени согласно исследованиям, описанным в [3]:

$$\Delta P_k = \frac{\Delta P_{кор\ ср}}{2} \cdot \left(\frac{U_{тек}}{U_{ном}} \right)^5,$$

где ΔP_k – потери мощности на корону в линии, МВт; $U_{ном}$ – номинальное напряжение, кВ; $U_{тек}$ – текущее значение напряжения, кВ; $\Delta P_{кор\ ср}$ – среднегодовые потери на корону согласно справочным данным, МВт.

Блок-диаграмма алгоритма показана на рис. 2.

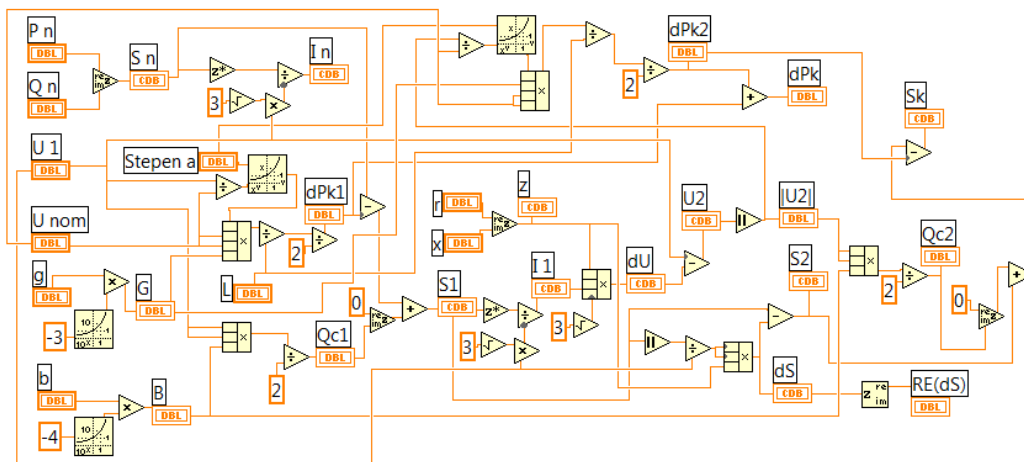


Рис. 2. Цифровой двойник ЛЭП

Условимся, что режимные параметры двойника ЛЭП P_n , Q_n , U_1 определяются посредством СВИ в комплексной форме с высокой точностью, что обеспечивается классом точности измерительных трансформаторов, высо-

кой разрядностью АЦП и частотой оцифровки. Эти данные попадают на сервер и используются как входные для анализа режима, оценки потерь в активных элементах схемы замещения ЛЭП и идентификации активной проводимости на линии в текущий момент времени, а также выбор оптимального напряжения в начале ЛЭП по условию минимума суммарных потерь.

Программа идентификации активной проводимости показана рис. 3.

После определения активной проводимости это значение передается в программу оптимизации напряжения методом деления отрезка пополам в интервале $\pm 10\% \cdot U_{\text{ном}}$. Алгоритм оптимизации показан на рис. 4, а его реализация в LabVIEW – на рис. 5.

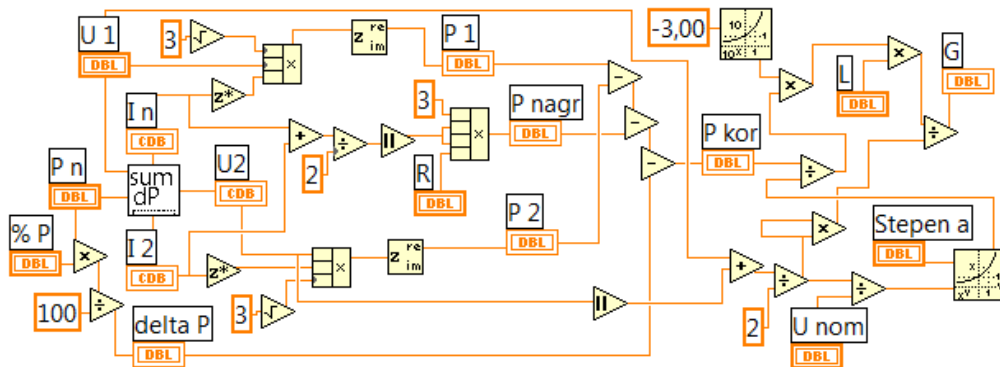


Рис. 3. Идентификация активной проводимости G

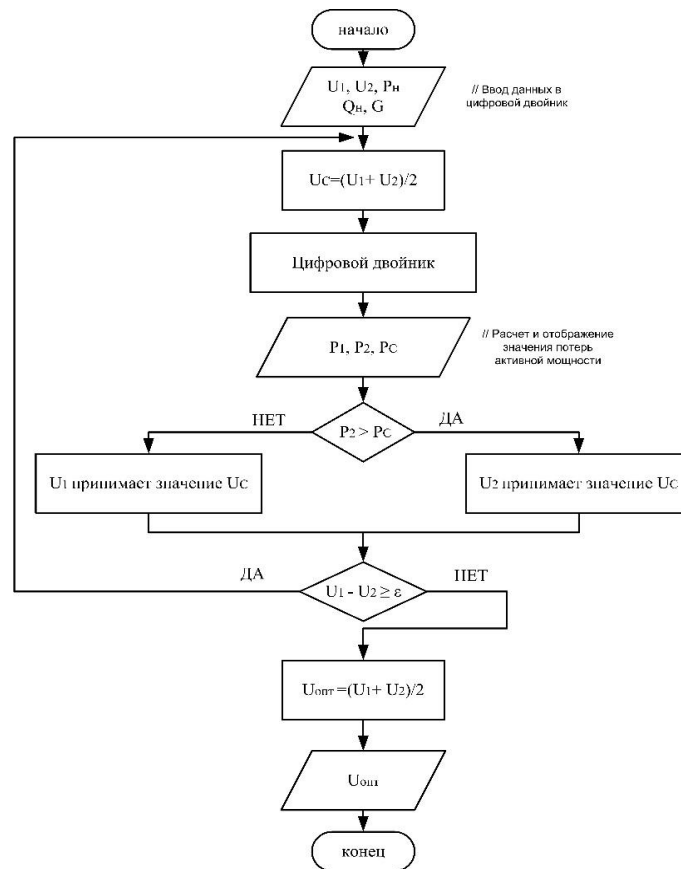


Рис. 4. Алгоритм оптимизации

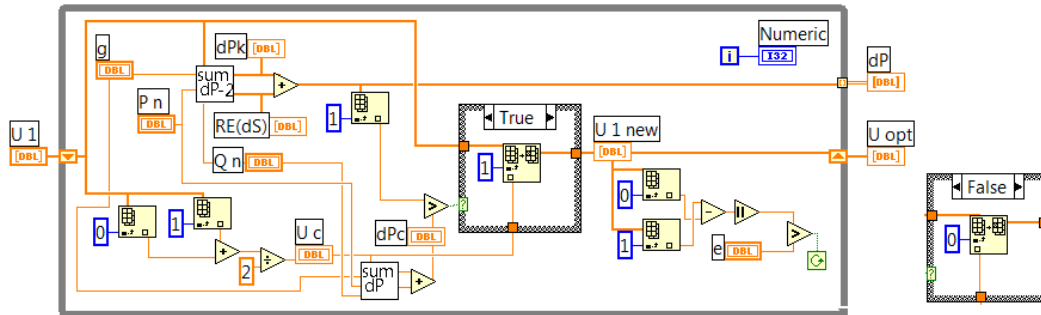


Рис. 5. Определение оптимального напряжения

Предлагаемая модель была применена для расчета режимов при разных погодных условиях: от хорошей погоды до изморози. В результате расчета режимов получены данные, указанные в табл.

Таблица

Результаты расчета режимов

Параметр	Значения ΔP в МВт и G в $\text{См} \cdot 10^{-6}$ при разных погодных условиях					
	хорошая 1	хорошая 2	хорошая 3	сухой снег	дождь	изморозь
Удельные потери на корону $\Delta P_{кор}$, кВт/км	1,05	1,45	2,3	8,8	29,0	76,0
Активная проводимость G	0,5	0,7	1,13	4,32	14,20	37,20
Потери мощности при $U_1 = 500$ кВ	5,80	6,18	7,044	13,21	32,50	77,42
Оптимальное напряжение $U_{опт}$, кВ	543,6	512,4	474,9	450	450	450
Потери мощности при $U_{опт}$	5,59	6,15	7,042	10,96	22,54	49,48
Снижение потерь мощности	0,21	0,03	0,002	2,25	9,96	27,94

Очевидно, что ухудшение погодных условий ведет к увеличению потерь активной мощности. Изменение суммарных потерь за счет регулирования напряжения при сухом снеге и более благоприятной погоде невелико. Большую роль играет регулирование при дожде и изморози. С учетом продолжительности для условий Урала дождя 360 ч/год и изморози 210 ч/год уменьшение потерь за год при оптимизации режима может составить примерно 9600 МВт · ч. При тарифе на электроэнергию 2,12 рубля за 1 кВт · ч экономия за год составит почти 20 млн руб. [4].

Заключение. Результаты исследований подтверждают высокий ожидаемый эффект предлагаемой системы управления режимом ЛЭП высокого напряжения на основе использования цифрового двойника и СВИ. При дальнейшем развитии системы будут рассмотрены вопросы учета влияния погодных условий и нагрузки ЛЭП на потери в активном сопротивлении и учет при оптимизации режимных ограничений.

Библиографический список

1. Шаров, Ю.В. Снижение потерь электроэнергии при внедрении Smart Grid / Ю.В. Шаров, В.Л. Пелымский, М.Г. Гаджиев // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение. – 2011. – № 6. – С. 60–64.
2. Шаров, Ю.В. Изменение потерь мощности на корону в линиях сверхвысокого напряжения ОАО «ФСК ЕЭС» / Ю.В. Шаров, М.Г. Гаджиев // Электро. – 2010. – № 3. – С. 19–23.
3. Тамазов, А.И. Корона на проводах воздушных линий переменного тока. Спутник+ / А.И. Тамазов. – М., 2002.
4. Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.

[К содержанию](#)