

УДК 621.31

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ЛИКВИДАЦИИ НЕДОПУСТИМЫХ ТОКОВЫХ ПЕРЕГРУЗОК СЕТЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КРУПНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

В.В. Петров, В.И. Полищук, А.А. Альмендеев

¹ Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

² Филиал АО «СО ЕЭС» – «Самарское РДУ»
Россия, 443100, г. Самара, ул. Полевая, 5

В процессе управления режимом энергосистемы нередки ситуации, связанные с недопустимыми перегрузками сетевых элементов, которые являются причиной выхода из строя оборудования и могут привести к каскадному развитию аварийного процесса в энергосистеме. Ввиду этого данные перегрузки ликвидируются оперативным персоналом электрических сетей различными способами, в том числе и путем отключения потребителей. В работе предложена методика ликвидации перегрузки сетевых элементов за счет использования регулирующего эффекта нагрузки, исключая или снижающая объемы вводимых ограничений. В ПК Mathcad для смоделированной энергосистемы произведены расчеты по предложенной методике, в результате которых достигнуто снижение загрузки системной связи.

Ключевые слова: *энергосистема, статические характеристики нагрузки, напряжение, оптимизация.*

Введение

В электроэнергетике различают два вида энергосистем: избыточные, где выработка электроэнергии значительно превышает ее потребление, и дефицитные, которые постоянно испытывают недостаток генерирующих мощностей. К дефицитным энергосистемам относятся энергосистемы крупных городов и промышленных объединений с энергоемким производством. Для снижения дефицита в таких энергосистемах необходимо вводить дополнительные мощности, что зачастую экономически не оправдано. Другим вариантом является строительство новых и техническая модернизация существующих электрических сетей, предназначенных для передачи мощности от избыточных районов с дешевой генерацией в дефицитные энергосистемы. Поэтому при высоком развитии электрических сетей задача снижения дефицита активной мощности в энергосистеме преобразуется в задачу обеспечения достаточной пропускной способности линий электропередач, осуществляющих связь дефицитной энергосистемы с единой энергосистемой. В результате различных техногенных и природных событий пропускная способность данных высоковольтных линий может оказаться недостаточной для покрытия дефицита активной мощности, вследствие чего оперативным персоналом электрических сетей принимаются меры по снижению дефицита активной мощности в энергосистеме. Такими мерами являются загрузка резервных мощностей дефицитной энергосистемы, изменение топологии сети. В случае их не-

Вячеслав Валерьевич Петров, аспирант.

Владимир Иосифович Полищук (к.т.н., доц.), заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий».

Андрей Аркадьевич Альмендеев (к.т.н.), диспетчер.

достаточной эффективности производится ввод графиков аварийных ограничений, что приводит к обесточиванию потребителей энергосистемы [1–4].

Целью данной работы является поиск альтернативных способов разгрузки сетевых элементов дефицитной энергосистемы, которые позволят минимизировать ввод аварийных ограничений или полностью их избежать.

Постановка задачи

Была рассмотрена теоретическая энергосистема (рис. 1), состоящая из четырех узлов с номинальным напряжением 110 кВ, двух узлов напряжением 220 кВ, пяти ветвей 110 кВ, одной ветви 220 кВ и одной трансформаторной ветви с номинальным коэффициентом трансформации $k_{mp} = 2$ (табл. 1). Узел № 4 является балансирующим по реактивной мощности, узел № 6 – балансирующим по активной и реактивной мощности, узел № 2 – узлом-генератором активной и реактивной мощности, узлы № 1, 3, 4, 5 – узлами нагрузки. Ветвь между узлами № 6 и № 5 моделирует связь изолированной энергосистемы с внешней энергосистемой.

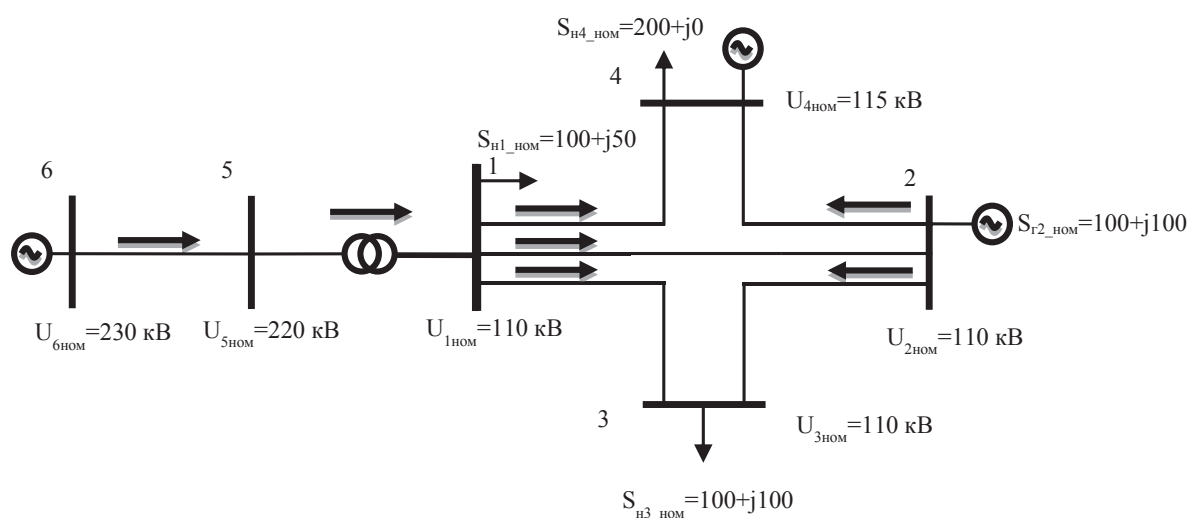


Рис. 1. Принципиальная схема рассматриваемой сети

Таблица 1

Исходные параметры узлов

№	P_G , МВт	Q_G , МВАр	$U_{эд}$, кВ	$P_{ном}$, МВт	$Q_{ном}$, МВАр
1	–	–	–	100,0	50
2	100,0	100,0	–	–	–
3	–	–	–	100,0	100,0
4	–	–	115,0	200,0	–
5	–	–	–	–	–
6	–	–	230,0	–	–

Как видно, при увеличении дефицита мощности в рассматриваемой энергосистеме переток по линии 6–5 также увеличится и при значительном дефиците ее токовая загрузка превысит свое длительно допустимое значение. Таким образом, задача сводится к уменьшению значения тока, протекающего по линии 6–5.

Методы и средства

Суть предлагаемого метода противоаварийного управления, который позволит снизить токовую загрузку системообразующего элемента, заключается в использовании регулирующего эффекта нагрузки, обусловленного ее статическими характеристиками по напряжению [5]:

$$P(U) = P_{ном} \left[0,83 - 0,3 \left(\frac{U}{U_{ном}} \right) + 0,47 \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^2 \right]; \quad (1)$$

$$Q(U) = Q_{ном} \left[3,7 - 7 \left(\frac{U}{U_{ном}} \right) + 4,3 \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где $P_{ном}$ – номинальная активная мощность нагрузки;
 $P(U)$ – расчетная активная мощность нагрузки;
 $Q_{ном}$ – номинальная реактивная мощность нагрузки;
 $Q(U)$ – расчетная реактивная мощность нагрузки;
 $U_{ном}$ – номинальное напряжение узла;
 U – расчетное напряжение в узле.

Как видно из (1) и (2), активная и реактивная мощность комплексных узлов нагрузки прямо пропорциональна напряжению, поэтому снижение напряжения приведет к снижению потребляемой активной и реактивной мощности в узлах, что обусловит уменьшение перетока мощности в систему. Однако при изменении напряжения происходит перераспределение перетоков активной и реактивной мощности, что может привести к недопустимым перегрузкам сетевых элементов рассматриваемой энергосистемы. Поэтому в процессе поиска необходимых значений напряжений нужно учесть ограничения по значению тока, протекающего в сетевых элементах:

$$I_{i,jy} < I_{i,jmax}.$$

Также в качестве ограничения выступает значение напряжения контрольных пунктов, которые определяются исходя из условий статической и динамической устойчивости:

$$U_{nmin} < U_{ny} < U_{nmax}.$$

Целевой функцией данной оптимизационной задачи является минимум потребляемой полной мощности энергосистемы:

$$I = S_{\text{ЭЭС}_y}(U) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $S_{\text{ЭЭС}_y}(U)$ – мощность энергосистемы в установившемся режиме.

Решение задачи оптимизации осуществлено в программном комплексе Mathcad с помощью метода приведенного градиента. После каждого шага оптимизации производится пересчет электрического режима по методу Ньютона [6].

Алгоритм решения:

1. Расчет электрического режима методом Ньютона.

1.1. Формирование матрицы уравнений небалансов мощностей для каждого узла:

$$W(X) = 0; \quad (4)$$

$$X = \begin{pmatrix} \delta \\ U \end{pmatrix} W(X) = \begin{pmatrix} w_P(x) \\ w_Q(x) \end{pmatrix}; \quad (5)$$

$$w_{P k} = P_k - g_{k,k} U_k^2 - U_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n+1} U_j (g_{k,j} \cos \delta_{k,j} - b_{k,j} \sin \delta_{k,j}); \quad (6)$$

$$w_{Q k} = Q_k - b_{k,k} U_k^2 - U_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n+1} U_j (b_{k,j} \cos \delta_{k,j} - g_{k,j} \sin \delta_{k,j}); \quad (7)$$

где X – вектор-столбец искоемых переменных;
 $W(X)$ – система уравнений балансов мощностей для каждого узла;
 δ – угол отклонения между фазами напряжений;
 U – напряжение в узле;
 $w_P(x), w_Q(x)$ – уравнения небаланса активной и реактивной мощности узла;
 P, Q – активные и реактивные мощности узла;
 g, b – активная и реактивная проводимости ветви;
 k, j – номера узлов.

1.2. Выбор начальных приближений для искоемых переменных.

Для нулевого шага итерации $\delta_k^0 = 0, U_k^0 = U_{ном}$. Для последующих шагов в качестве начальных приближений используются значения, полученные в результате решения системы уравнений методом Гаусса в п. 1.4. Значение напряжений узлов-генераторов является неизменным.

1.3. Формирование матрицы Якоби:

$$\frac{\partial W}{\partial X} = \begin{vmatrix} \frac{\partial W_P}{\partial U} & \frac{\partial W_P}{\partial \delta} \\ \frac{\partial W_Q}{\partial U} & \frac{\partial W_Q}{\partial \delta} \end{vmatrix}, \quad (8)$$

где $\frac{\partial W_P}{\partial U}, \frac{\partial W_Q}{\partial U}$ – частные производные небаланса активной и реактивной мощности соответственно по модулю напряжения узла;

$\frac{\partial W_P}{\partial \delta}, \frac{\partial W_Q}{\partial \delta}$ – частные производные небаланса активной и реактивной мощности соответственно по фазе напряжения узла.

1.4. Определение неизвестных переменных методом Гаусса:

$$X^{(i+1)} = X^i - \left\| \frac{\partial W}{\partial X} (X^i) \right\|^{-1} W(X^i), \quad (9)$$

где i – шаг итерации.

Результатом выполнения данного подцикла являются новые значения напряжений и углов отклонений фаз напряжений в соответствии с выбранными на шаге 1.2 приближениями. Поэтому для расчета электрического режима с за-

данной точностью необходимо повторить пункты 1.2–1.4 вплоть до достижения допустимой погрешности расчета.

1.5. Определение токовой нагрузки ветвей схемы.

Исходя из результатов, полученных на предыдущем шаге, производится расчет токовой загрузки ветвей схемы. Это необходимо для контроля выполнения установленных ограничений в полученном электрическом режиме.

2. Формирование целевой функции:

$$I[X'(Y'), Y'], \quad (10)$$

где X' – вектор зависимых переменных: U, δ узлов нагрузки;
 Y' – вектор независимых переменных: U, δ узлов-генераторов.

3. Проверка выполнения заданных ограничений:

$$U_{\min} < U_n < U_{\max};$$

$$I_{i,j} < I_{\max i,j},$$

где $U_{n\min}$ – минимально допустимое значение напряжения в контрольном пункте;

$U_{n\max}$ – максимально допустимое значение напряжения в контрольном пункте;

U_{ny} – установившееся значение напряжения в контрольном пункте;

$I_{i,jy}$ – ток, протекающий по сетевому элементу в установившемся режиме;

$I_{i,j\max}$ – длительно допустимый ток сетевого элемента.

4. Определение градиента неявной функции:

$$\frac{\partial I}{\partial Y'} = \frac{\partial I}{\partial Y'} \Big|_0 + \frac{\partial I}{\partial W} \cdot \frac{\partial W}{\partial Y'}, \quad (11)$$

где $\frac{\partial I}{\partial Y'}$ – градиент неявной функции по вектору независимых переменных;

$\frac{\partial I}{\partial Y'} \Big|_0$ – вектор, определяемый из явной зависимости $I(Y')$;

$\frac{\partial W}{\partial Y'}$ – матрица частных производных $\frac{\partial w_{Pk}}{\partial Y'_j}, \frac{\partial w_{Qk}}{\partial Y'_j}$, определяемых из яв-

ных зависимостей $w_{Pk}(Y'), w_{Qk}(Y')$;

$\frac{\partial I}{\partial W} = \left(\frac{\partial I}{\partial W_P} \quad \frac{\partial I}{\partial W_Q} \right)$ – вектор-строка частных производных, причем $\frac{\partial I}{\partial W}$

определяется из следующего выражения:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial W_P}{\partial U} & \frac{\partial W_P}{\partial \delta} \\ \frac{\partial W_Q}{\partial U} & \frac{\partial W_Q}{\partial \delta} \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial I}{\partial W_P} \\ \frac{\partial I}{\partial W_Q} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \frac{\partial I}{\partial U} \\ \frac{\partial I}{\partial \delta} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

5. Определение независимых переменных

$$Y'^i = Y'^{i-1} - \frac{\partial I}{\partial Y'} \cdot t_0, \quad (13)$$

где Y^i – значение вектора независимых переменных на шаге итерации i .

6. Определение зависимых переменных с помощью расчета электрического режима методом Ньютона в соответствии с п. 1.2–1.4. При оптимизации по напряжению в результате выполнения данного шага получают новые значения напряжений узлов-генераторов.

7. Для оптимизации электрического режима с заданной точностью необходимо повторить выполнение п. 3–5 вплоть до достижения допустимой погрешности расчетов.

В качестве оптимизируемых переменных выбраны коэффициент трансформации k_{mp} и напряжение в узле, балансирующем по реактивной мощности, № 4. В качестве ограничений значения токов и напряжений сетевых элементов и контрольных пунктов изолированной энергосистемы:

$$95\text{кВ} < U_i < 126\text{кВ};$$

$$I_{i,j} < 750\text{А}.$$

В результате выполнения операций пункта 1 приведенного выше алгоритма были получены следующие данные (табл. 2).

Таблица 2

Параметры узлов в исходном режиме $k_{mp} = 2$

№	P_G , МВт	Q_G , МВАр	P_H , МВт	Q_H , МВАр	U , кВ
1	–	–	102,55	53,43	114,27
2	100,0	100,0	–	–	115,34
3	–	–	101,21	103,14	112,05
4	–	132,28	206,01	–	115
5	–	–	–	–	228,45
6	316,2	20,42	–	–	230

Исходя из данных табл. 2 установлено, что по системной связи 6–5 протекает ток 798 А, что превышает длительно допустимый ток по условиям задачи. Для ликвидации данной перегрузки была проведена оптимизация электрического режима путем выполнения пунктов 2–6 алгоритма с целью снижения потребления мощности изолированной энергосистемы. В результате получены следующие данные (табл. 3).

Таблица 3

Токовая загрузка линий в исходном режиме

№ н	1	1	1	2	2	6
№ к	2	3	4	3	4	5
I, А	499	456	540	311	609	798

Номинальные и установившиеся параметры узлов в оптимизированном режиме

№	$P_{Гу}$, МВт	$Q_{Гу}$, МВАр	$P_{ну}$, МВт	$Q_{ну}$, МВАр	U_y , кВ
1	–	–	93,17	43,59	97,17
2	100,0	100,0	–	–	98,39
3	–	–	92,14	86,17	94,98
4	–	103,03	186,97	–	97,81
5	–	–	–	–	228,74
6	278,6	5,2	–	–	230

Таблица 5

Токовая нагрузка линий в оптимизированном режиме

№ н	1	1	1	2	2	6
№ к	2	3	4	3	4	5
I, А	520	469	547	321	640	701

Как видно, в результате решения задачи оптимизации были получены новые значения напряжений в контрольных пунктах энергосистемы и коэффициента трансформации, при которых обеспечивается минимум потребления активной и реактивной мощности в энергосистеме при соблюдении заданных ограничений. Новое значение токовой нагрузки линии 6–5 составляет 701 А. Данный режим достигается при коэффициенте трансформации $k_{mp} = 2,37$ и напряжении в узле, балансирующем по реактивной мощности, $U_4 = 97,81$ кВ.

Выводы

Таким образом, в данной работе отображена эффективность применения снижения напряжения в энергосистеме как противоаварийного мероприятия по разгрузке сетевых элементов. Было достигнуто снижение значения протекающего по системообразующей линии тока на 97 А за счет снижения потребления мощности изолированной энергосистемы, что позволило ликвидировать недопустимую перегрузку системной связи без использования методов противоаварийного управления, связанных с отключением потребителей. Полученные результаты полностью согласуются с результатами прошлых исследований, выполненных другими методами [7] и с применением других программных комплексов, что подтверждает возможность применения данного способа противоаварийного управления на практике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СТО 59012820.29.240.008-2008 Стандарт организации ОАО «СО ЕЭС» // Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Условия организации процесса. Условия создания объекта. Нормы и требования. – М.: [б.н.], 2008.

2. СТО 59012820.27.010.001-2013 Стандарт организации ОАО «СО ЕЭС» // Правила определения максимально допустимых и аварийно допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях диспетчерского центра ОАО «СО ЕЭС». – М.: [б.н.], 2013.
3. РД 34.20.577 Нормативные документы // Методические указания по определению устойчивости энергосистем. – 1977.
4. Методические указания // Методические указания по устойчивости энергосистем. – М.: НЦ ЭНАС, 2004.
5. *Идельчик В.И.* Электрические системы и сети. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
6. Инструкция по использованию ПК RastrWin 3.0. – 2014.
7. *Петров В.В., Альмендеев А.А., Котенев В.И.* Использование статических характеристик крупных узлов нагрузки при ликвидации аварийных режимов энергосистем // Оперативное управление в электроэнергетике. – 2016. – № 2. – С. 42–46.

Статья поступила в редакцию 30 сентября 2016 г.

IMPROVEMENT OF METHODS FOR THE ELIMINATION OF UNACCEPTABLE CURRENT OVERLOAD OF NETWORK ELEMENTS IN LARGE POWER SYSTEMS.

V.V. Petrov¹, V.I. Polishhuk¹, A.A. Almendeev²

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

² Branch of «SO UPS» – «Samara RDO»
5, Polevaja str., Samara, 443100, Russian Federation

In the process of control power system there are frequent situation associated with inadmissible overload of electrical network elements resulted in the equipment failure and cascade development of emergency process in the power system. This overload is eliminated by the operational personnel of electrical networks in a variety of ways including load shedding. In this paper the technique of overloading elimination of electrical network elements using the regulating load effect of eliminating or reducing the volume energy consumption constraint is proposed. In the PC Mathcad for simulated power system the calculations on the proposed method are given resulted in download system reduction of communication.

Keywords: *power system, static characteristics of the load nodes, voltage, optimization.*

*Vyacheslav V. Petrov, Postgraduate Student.
Vladimir I. Polishhuk (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Andrey A. Almendeev (Ph.D. (Techn.)), Dispatcher.*