

УДК 621.315

**ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ
ПО СНИЖЕНИЮ ПОТЕРЬ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТИ***Галстян Р. А.*

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону,
Российская Федерация
galstyan.razmik2015@yandex.ru

Рассматриваются организационные мероприятия по снижению потерь электроэнергии в сети: размыкание сети 110 кВ и оптимизация рабочих напряжений в центрах питания. Каждое мероприятие анализируется с точки зрения снижения активных потерь. Результаты проведенной работы позволяют утверждать, что оптимизация рабочих напряжений в центрах питания обеспечивает минимум потерь в сети, поэтому она эффективнее, чем размыкание. Кроме того, при оптимизации увеличивается пропускная способность линии, и надежность сети не нарушается. Таким образом, появляется возможность передавать большой поток мощности, что выгодно с экономической точки зрения.

Ключевые слова: потери электроэнергии, снижение потерь электроэнергии, рабочее напряжение, размыкание сети, оптимизация мест размыкания контуров электрических сетей, оптимизация рабочих напряжений в центрах питания, естественное распределение мощностей, экономическое распределение мощностей, последовательный регулировочный трансформатор.

Введение. Уровень потерь электроэнергии в сети является важнейшим показателем рентабельности ее работы. Для снижения потерь необходимо разрабатывать и проводить специальные организационные и технические мероприятия. Первые не требуют дополнительных капиталовложений, вторые подразумевают внедрение нового оборудования, что не всегда эффективно с экономической точки зрения.

UDC 621.315

**ORGANIZATIONAL MEASURES TO
REDUCE ELECTRICITY LOSSES IN THE
NETWORK***Galstyan R. A.*

Don State Technical University,
Rostov-on-Don,
Russian Federation
galstyan.razmik2015@yandex.ru

The paper considers organizational measures to reduce electricity losses in the network, namely breaking of the 110 kV network and the optimization of operating voltages in main substations. Each event is analyzed in terms of reducing active losses. The results of this work suggest that the optimization of the operating voltages in the power centers ensures a minimum of losses in the network, so it is more efficient than opening. In addition, when optimizing the capacity of the line increases, and the reliability of the network is not compromised. Thus, it is possible to transmit a large flow of power, which is beneficial from an economic point of view.

Keywords electric power losses, reduction of electric power losses, operating voltage, network disconnection, optimization of electrical circuit disconnection points, optimization of operating voltages in power centers, natural power distribution, economic power distribution, sequential adjusting transformer.

Общие сведения о потерях. Невозможно полностью исключить потери электроэнергии, так как определенное ее количество расходуется при прохождении электрического тока по элементам силовой цепи, а также на ее обслуживание [1].

Потери, приходящиеся на потребителей, учитываются при помощи следующего оборудования:

- автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии,
- счетчики (устанавливаются у потребителей и на подстанциях).

Потери в элементах электрической цепи вычисляются по формулам, соответствующим схемам замещения элементов: линий электропередач, кабельных линий, трансформаторов, компенсирующих устройств, реакторов [2].

Вопрос расчета потерь электроэнергии интересен, в первую очередь, с точки зрения уменьшения расхода энергоносителя на электростанциях, что, в свою очередь, позволяет увеличить рентабельность работы объекта [3]. Немаловажен и тот факт, что при использовании переменного тока мощность имеет активную и реактивную составляющие: активная проявляется в нагреве оборудования, а реактивная создает проблемы падения напряжения на концах линии. Указанные недостатки можно ликвидировать двумя методами:

- изменением длины линии,
- повышением емкостной составляющей тока нагрузки.

В первом случае можно изменять частоту либо создавать более близкие центры питания нагрузок. Во втором случае необходимо компенсировать реактивную составляющую путем установки компенсирующих устройств, таких как синхронные компенсаторы или статические батареи конденсаторов.

Снижение потерь электроэнергии. Известные на сегодня методики позволяют снижать потери на различных этапах производства, реализации и использования ресурса. Наиболее масштабные с экономической точки зрения (то есть максимально затратные) задачи связаны с тремя процессами:

- производство электроэнергии (мероприятия по повышению экономичности электростанции);
- передача и распределение электроэнергии (мероприятия по повышению экономичности сетей);
- реализация электроэнергии (мероприятия по снижению коммерческих потерь).

Мероприятия по снижению технических потерь в сетях преследуют две основные цели:

- целевое снижение потерь;
- сопутствующее снижение потерь.

Кроме перечисленных выше проводятся также:

- организационные мероприятия;
- мероприятия по совершенствованию систем учета.

Рассмотрим более подробно два вида организационных мероприятий:

- оптимизация мест размыкания контуров электрических сетей с различными номинальными напряжениями,
- оптимизация рабочих напряжений в центрах питания.

Их реализация не требует существенных затрат. Выбор названных выше мероприятий обусловлен номинальным напряжением сети и требованиями надежности электроснабжения.

Оптимизация мест размыкания контуров электрических сетей с различными номинальными напряжениями. Известно, что минимуму потерь активной мощности и энергии соот-

ветствует распределение мощностей в сети с активными сопротивлениями. Такое распределение мощностей, соответствующее экономическому, устанавливается лишь в однородных сетях, на всех участках которых отношение R_0/X_0 одинаково. Разные отношения R_0/X_0 на участках неоднородной сети обуславливают появление уравнивающих токов, увеличивающих потери мощности и энергии. Чем больше неоднородных участков, тем заметнее растут потери мощности.

Наибольшая неоднородность наблюдается в замкнутых контурах, образованных сетями разных номинальных напряжений, связанных между собой через обмотки трансформаторов. Индуктивное сопротивление обмоток трансформаторов больше активного в 10–30 раз, в то время как в воздушных линиях (ВЛ) электропередачи это отношение равно 2–3 [4].

Можно получить экономическое распределение мощностей в неоднородной сети, если на естественное распределение наложить уравнивающую мощность, создаваемую, например, с помощью последовательного регулировочного трансформатора (ПРТ) и направленную против естественной уравнивающей мощности.

При введении в контур электродвижущей силы (ЭДС) уравнивающая мощность, создаваемая этой ЭДС, будет равна:

$$S_y = P_y - jQ_y = \sqrt{3} \cdot U \cdot i_y = \frac{U \times \dot{E}}{Z_k} = \frac{U \cdot (E' + jE'')}{R_k + jX_k},$$

где E' и E'' — соответственно продольная и поперечная составляющие уравнивающей ЭДС, создаваемой с помощью ПРТ.

Если в контур включены трансформаторы связи сетей двух различных номинальных напряжений и их коэффициенты трансформации не уравновешены, то они создают в контуре продольную ЭДС:

$$E'_m = U \cdot \left(1 - \prod_{i=1}^n k_1 \right),$$

где n — число трансформаций в контуре.

Соответствующим подбором коэффициентов трансформаторов можно улучшить распределение мощностей в замкнутых контурах и повысить уровень напряжения. За счет этого снизим потери мощности и энергии и повысим коэффициент полезного действия (КПД) сети.

При отсутствии ПРТ можно снизить потери с помощью принудительного изменения потораспределения путем размыкания питающей сети. В данном случае необходимо определить, в каком месте следует размыкать сеть, чтобы потери активной мощности были минимальны. Недостатком такого подхода является понижение надежности, поэтому предварительно надо решить вопрос о допустимости размыкания с точки зрения надежности электроснабжения и режимов напряжения. Выполнить операцию размыкания можно при помощи ЭВМ в программе RastrWin.

Исходная схема, которую нужно разомкнуть, изображена на рис. 1.

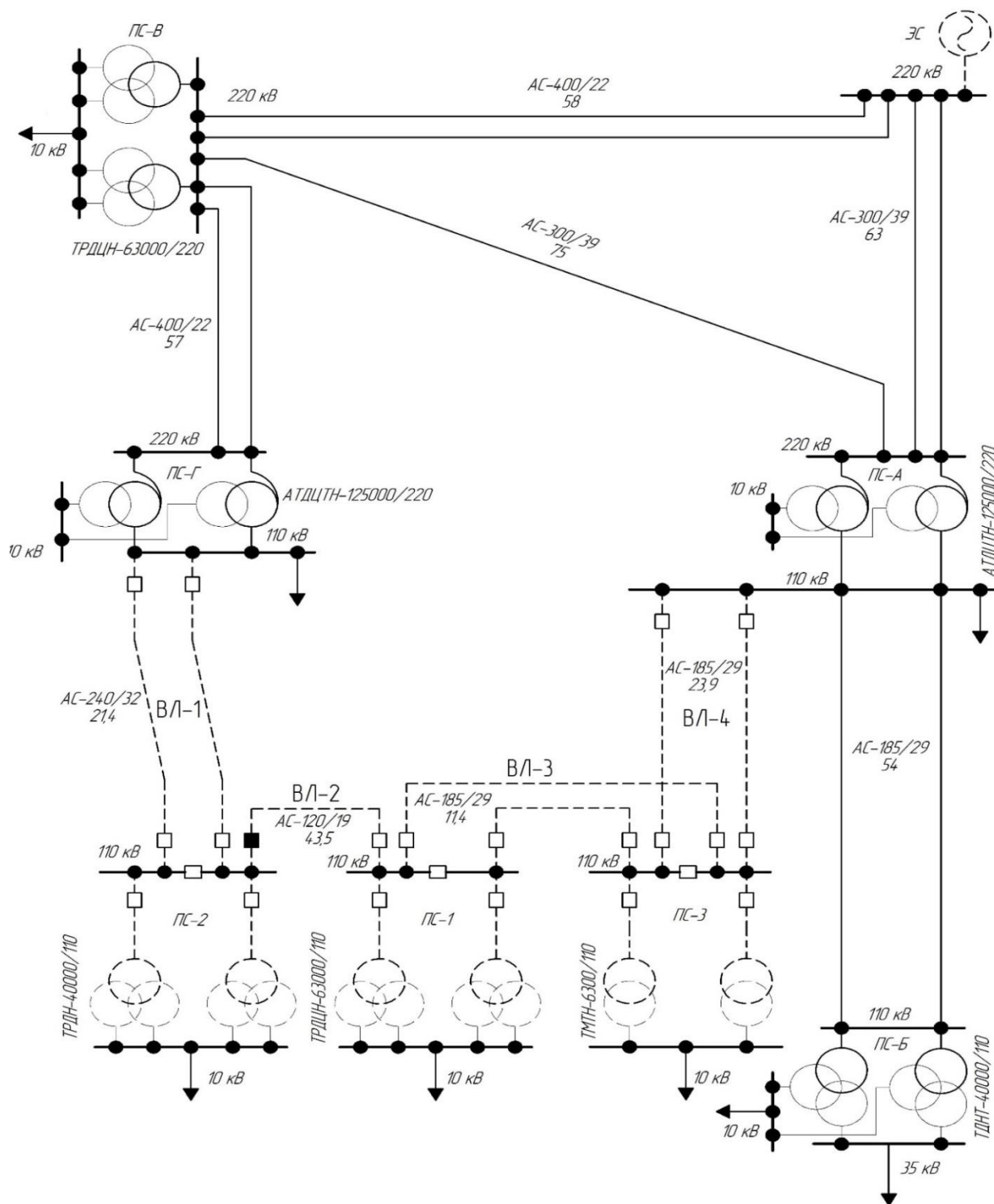


Рис. 1. Исходная схема сети, которую следует разомкнуть

Ниже представлен алгоритм размыкания сети 110 кВ в программе RastrWin.

1. Создать исходную модель сети, оптимизировать напряжение в узлах и рассчитать режим ее работы.
2. Найти активные потери мощности в первоначальной схеме сети.
3. Поочередно отключать ВЛ-1, ВЛ-2, ВЛ-3 и ВЛ-4 и выяснить, в каком случае потери минимальны.

Результаты проведенного мероприятия представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты размыкания сети 110 кВ

Исходный вариант	Суммарные нагрузочные потери в сети		
	$U_{\text{ном}} = 110 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 220 \text{ кВ}$	Всего
	2	4,12	6,12
ВЛ-1	8,94	4,88	13,81
ВЛ-2	1,93	4,06	5,99
ВЛ-3	8,46	6,06	14,52
ВЛ-4	10,9	6,66	17,57

Из табл. 1 наглядно видно, что размыкание ВЛ-2 дает наибольший эффект. Остальные отключать не стоит: они питают нагруженные подстанции, то есть отключение одной линии приведет к недопустимой перегрузке остальных. Для устранения перегруза на линиях понадобятся провода больших сечений, что неэффективно с экономической точки зрения.

Оптимизация рабочих напряжений в центрах питания. Уровень рабочего напряжения влияет на потери и пропускную способность сети. При повышении напряжения на $\Delta U\%$ потери мощности в сопротивлениях сети снижаются, а в проводимостях увеличиваются пропорционально квадрату напряжения.

Количественное изменение нагрузочных потерь мощности при отклонениях напряжения от номинального можно оценить выражением:

$$\Delta P_k \% = 1 - \frac{1}{\left(1 \pm \frac{\Delta U \%}{100}\right)^2}.$$

Потери холостого хода вычисляются по формуле:

$$\Delta P_x \% = \left(1 \pm \frac{\Delta U \%}{100}\right)^2 - 1.$$

Правила устройства электроустановок (ПУЭ) [5] допускают превышение рабочего напряжения сети сверх номинального на 15% в сетях 35–220 кВ, на 10% в сетях 330 кВ и на 5% в сетях 500 кВ и выше. Отсюда следует, что в сетях до 220 кВ включительно существуют технические возможности использования эффекта снижения нагрузочных потерь мощности и энергии за счет повышения рабочего уровня напряжения. Рассмотрим, как при этом изменяются потери холостого хода.

Потери холостого хода в трансформаторах зависят от подводимого напряжения к их ответвлениям, а не от уровня напряжения в сети. Переключая ответвления трансформаторов в соответствии с подводимым к ним рабочим напряжением, можно удерживать потери холостого хода в трансформаторах на постоянном уровне.

Для поддержания рабочего напряжения на высоком уровне необходимо располагать достаточным арсеналом регулирующих устройств и обеспечить положительный баланс реактивной мощности в основных узлах сети. С точки зрения обеспечения требований к качеству напряжения у потребителей на вторичных шинах понижающих трансформаторов необходимо добиться напряжения 1,05–1,1 номинального для режимов максимальных нагрузок и номинального — для режимов минимальных нагрузок [6].

Под арсеналом регулирующих устройств следует понимать генераторы электростанций, РПН и переключатели без возбуждения на трансформаторах, специальные вольтодобавочные и регулировочные трансформаторы, трансформаторы с продольно-поперечным регулированием, синхронные компенсаторы, батареи статических конденсаторов, шунтирующие реакторы.

В сложносвязанных неоднородных электрических сетях можно достичь определенного повышения уровня рабочего напряжения и снижения нагрузочных потерь энергии за счет подавления уравнивающих токов, вызванных неоднородностью сети. Противо-ЭДС вводится в контуры подбором неуравновешенных коэффициентов трансформации на контурных трансформаторах, связывающих электрические сети разных номинальных напряжений. Контурные трансформаторы переключаются на разные группы соединения обмоток. При этом используются специальные трансформаторы с продольно-поперечным регулированием [7].

Регулировать напряжение будем при помощи РПН, установленных на автотрансформаторах подстанции А и Г (см. рис. 1).

Коэффициент трансформации рассчитывается по формуле:

$$K_{B-C} = \frac{U_{C.ном}}{U_{B.ном}}; K_{B-H} = \frac{U_{H.ном}}{U_{B.ном}}$$

Коэффициент трансформации n -й ступени вычисляется по формуле:

$$K_{m.B-C} = K_{n.B-C} (1 \pm n \Delta U_{ст.РПН*})$$

Воспользуемся программой RastrWin для вычисления потери мощности при определенном коэффициенте трансформации. Результаты поиска минимума потерь приведены в табл. 2 (НД — недопустимое значение напряжения).

Таблица 2

Потери мощности при определенном коэффициенте трансформации

		Коэффициенты трансформации автотрансформаторов ПС-А													
		6	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	
		0,589	0,579	0,568	0,558	0,547	0,537	0,526	0,516	0,505	0,495	0,484	0,473	0,463	
6	0,589	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
5	0,579	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
4	0,568	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
3	0,558	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
2	0,547	НД	НД	НД	НД	НД	НД	6,11	6,33	6,65	7,02	7,5	НД	НД	
1	0,537	НД	НД	НД	НД	НД	5,95	6,02	6,21	6,47	6,77	7,19	НД	НД	
0	0,526	НД	НД	НД	НД	НД	6,02	6,04	6,14	6,33	6,57	6,92	НД	НД	
-1	0,516	НД	НД	НД	НД	НД	6,16	6,13	6,99	6,27	6,45	НД	НД	НД	
-2	0,505	НД	НД	НД	НД	6,54	6,38	6,26	6,23	6,29	6,37	НД	НД	НД	
-3	0,495	НД	НД	НД	НД	6,87	6,64	6,46	6,39	6,36	НД	НД	НД	НД	
-4	0,484	НД	НД	НД	НД	7,33	7,04	6,79	НД	НД	НД	НД	НД	НД	
-5	0,473	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	
-6	0,463	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	

Данные табл. 2 показывают, как меняется суммарное значение потери мощности при определенном коэффициенте трансформации. Первая ступень трансформации является благоприятной, так как обеспечивает минимум потерь и надежность сети.

Расчет эффективности проведенных мероприятий. Оценить эффективность мероприятия можно, подсчитав финансовую выгоду за определенное время (например, за год). Рассмотренные мероприятия не требуют существенных затрат, поэтому при оценке эффективности учитывается величина потерь электроэнергии. Результаты расчета потерь электроэнергии исходного варианта и после проведения мероприятий представлены в табл. 3

Таблица 3

Потери электроэнергии в сети

Составляющие потерь электроэнергии	Варианты		
	Исходный	1-й	2-й
Потери холостого хода трансформаторов	6377,28	6377,28	6377,28
Потери на корону	5960,31	5960,31	5960,31
Нагрузочные потери в линиях	17657,76	13752,15	13642,13
Нагрузочные потери в трансформаторах	2912,22	2669,53	2669,53
Всего	32907,57	28759,27	28649,25
Снижение потерь после мероприятия	–	4148,3	4258,32

Выводы. Анализ табл. 3 позволяет сделать вывод, что оптимизация рабочих напряжений в центрах питания обеспечивает минимум потерь в сети, поэтому она эффективнее, чем размыкание. Кроме того, при оптимизации увеличивается пропускная способность линии, и надежность сети не нарушается. Таким образом, появляется возможность передавать большой поток мощности, что выгодно с экономической точки зрения.

Библиографический список

1. Герасименко, А. А. Передача и распределение электрической энергии / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. — 3-е изд., перераб. — Москва : КНОРУС, 2012. — 648 с.
2. Электрические системы и сети / Н. В. Буслова [и др.] ; под ред. Г. И. Денисенко. — Киев : Вища школа, 1986. — 584 с.
3. Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям : Приказ от 30 декабря 2008 г. № 326 [Электронный ресурс] / Министерство энергетики РФ. — Режим доступа: <http://base.garant.ru/195516/> (дата обращения 09.03.18).
4. Файбисович, Д. Л. Справочник по проектированию электрических сетей / Д. Л. Файбисович. — Москва : Изд-во НИЦ ЭНАС, 2006. — 350 с.
5. Правила устройства электроустановок / Минэнерго России. — 7-е изд. — Москва : Изд-во Главгосэнергонадзора России, 2007. — 980 с.
6. Неклепаев, Б. Н. Электрическая часть электростанции и подстанции : справ. мат-лы для курсового и дипломного проектирования / Б. Н. Неклепаев, И. П. Крючков. — Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2013. — 608 с.
7. Рожкова, Л. Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций / Л. Д. Рожкова, Л. К. Карнеева, Т. В. Чиркова. — Москва : Академия, 2005. — 448 с.