

# ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ ГИБКИХ ПЕРЕДАЧ

**И.М. Курпичникова, К.Е. Горшков, Р.В. Сабитов**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

Статья посвящена вопросу оптимизации, сокращению потерь и увеличению устойчивости сети за счет внедрения устройств, позволяющих влиять на режим и перетоки мощности электрической сети. Основную роль в развитии ЭС играют современные технические средства и технологии, обеспечивающие управляемость электрической сети и реализацию управления. Одной из наиболее перспективных в этой области являются FACTS-технологии или гибкие управляемые элементы электрической сети, суть которых состоит в том, что электрическая сеть из пассивного устройства транспорта электроэнергии превращается в устройство, активно участвующее в управлении режимами работы электрических сетей. В статье проведен анализ развития сети 500/220/110 кВ с применением устройств, позволяющих влиять на работу сети: СТК, БСК, УПК. Рассчитаны установившиеся режимы, потери активной мощности, потери электроэнергии за год до и после применения устройств. Произведен анализ эффективности применения каждого устройства. Выполнен расчет электрической сети 500/220/110 кВ в аварийном режиме при отключении линии 500 кВ с применением СТК. Проанализирована эффективность использования устройства СТК в аварийном режиме.

*Ключевые слова:* аварийный режим, управляемые линии электропередачи, повышение эффективности, распределение перетоков мощности, снижение потерь, повышение устойчивости системы, оптимизация.

## Введение

Проблемы, которые возникли после преобразований в электроэнергетике России, появления новых технологий и средств генерации, передачи и потребления электроэнергии, а также получения, передачи, обработки и представления информации, современных компьютерных и информационных технологий, методов искусственного интеллекта, привели к изменению теоретических основ и средств управления режимами электроэнергетической системы России [1–5].

Проблемой энергосистемы России можно назвать малое число регулирующих устройств, что затрудняет оптимальное потокораспределение.

Массовое строительство новых линий электропередачи с целью увеличения пропускной способности существующих линий экономически не выгодно. Поэтому одним из решений может стать эксплуатация существующих линий электропередачи, но с применением устройств FACTS.

FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) – управляемые (гибкие) системы передачи переменного тока – это современная технология [1, 6–14], основой которой являются устройства FACTS, трансформирующие электрическую сеть из неактивного устройства транспорта электроэнергии в активное устройство, участвующее в управлении режимами работы ЭЭС. Технология FACTS открывает новые возможности для управления электроэнергетическими системами, так как обеспечивает регулирование взаимосвязанных параметров схемы и режима [15–17].

## Постановка задачи

В данной статье проводится анализ оптимизации электрической сети за счет внедрения устройств, позволяющих влиять на режим и перетоки мощности электрической сети.

## Теоретическая часть

### Параметры рассматриваемой сети

На рис. 1, в программе NetWorks смоделирована электрическая сеть 500/220/110 кВ. По результатам расчета программы суммарные потери активной мощности в сети составили 65,5 МВт.

Годовые потери для рассматриваемой электрической сети найдем на основании максимального числа часов потерь:

$$\delta \mathcal{E} = \delta P \cdot \tau, \text{ МВт} \cdot \text{ч}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – время максимальных потерь за год;  $\delta P$  – суммарные потери активной мощности в системе.

$$\tau = \left( 0,124 + \frac{T_{M_{\text{ср.в}}}}{10\,000} \right)^2 \cdot 8760, \text{ ч}, \quad (2)$$

где  $T_{M_{\text{ср.в}}}$  – средневзвешенное число часов использования максимальной нагрузки, которое определяется по формуле

$$T_{M_{\text{ср.в}}} = \sum \frac{P}{P_{\text{сум}}} \cdot T_M, \text{ ч}, \quad (3)$$

где  $P$  – мощность одного узла;  $P_{\text{сум}}$  – суммарная мощность нагрузки;  $T_M$  – число часов использования максимальной нагрузки каждого узла.

В табл. 1 приведена мощность в узлах.

В табл. 2 приведено число часов использования максимума нагрузки.

В табл. 3 приведены параметры трансформаторов, установленных на ПС Шагол и ПС Козырево.

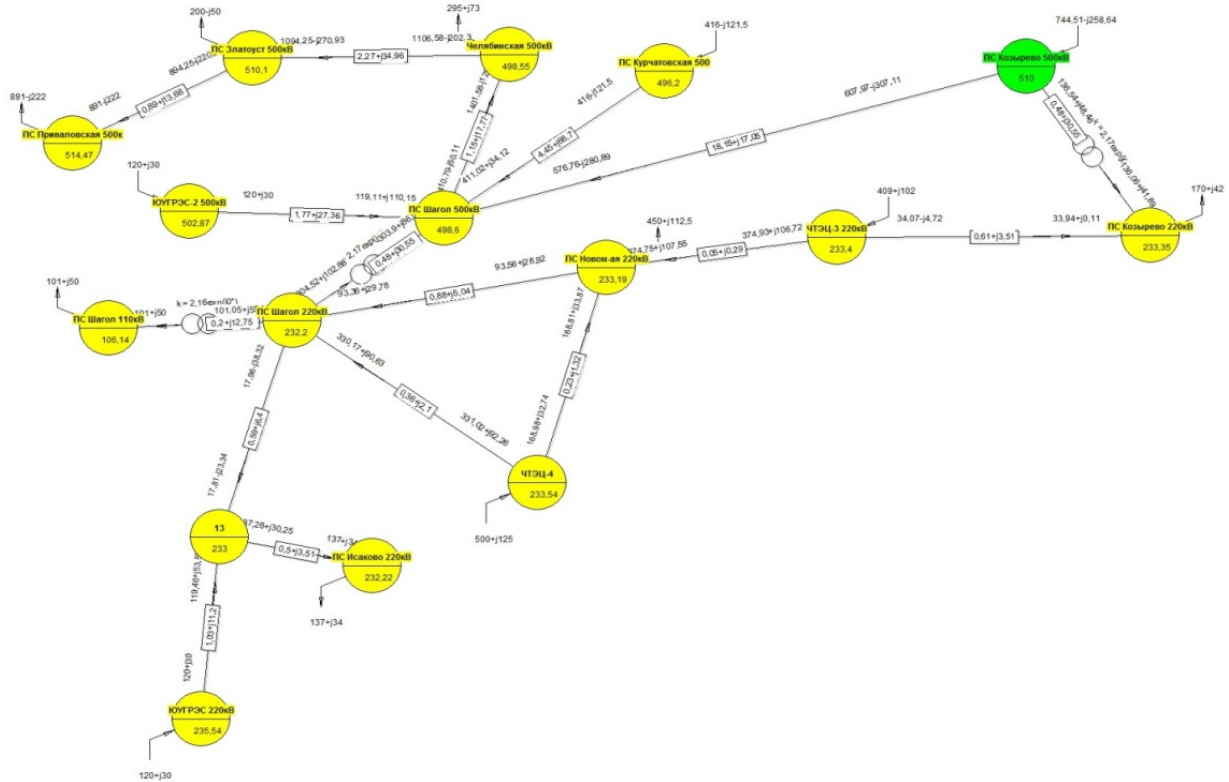


Рис. 1. Параметры установившегося режима

Мощность в энергоузле

Таблица 1

Энергоузел	Мощность, МВА
Челябинская 500 кВ	$295 + j73$
Златоуст 500 кВ	$200 - j50$
Приваловская 500 кВ	$891 - j222$
Курчатовская 500 кВ	$-416 + j121,5$
ЮУГРЭС2 500 кВ	$-120 - j30$
Козырево 500 кВ	$-747,2 + j258,6$
Козырево 220 кВ	$170 + j42$
ЧТЭЦ-3	$-409 - j102$
Новометаллургическая	$450 + j112,5$
ЧТЭЦ-4	$-500 - j125$
Шагол 110 кВ	$101 + j50$
Исаково 220 кВ	$137 + j34$
ЮУГРЭС 220 кВ	$-120 - j30$

Число часов использования максимума нагрузки

Таблица 2

Узел	$T_M$
Челябинская 500 кВ	5000
Златоуст 500 кВ	6000
Приваловская 500 кВ	4500
Козырево 220 кВ	5000
Новометаллургическая 220 кВ	5250
Шагол 110 кВ	5000
Исаково 220 кВ	5300

Таблица 3

Параметры трансформаторов

Тип	РПН	$u_k, \%$			$\Delta P_k,$ ВН- СН, кВт	$\Delta P_x,$ кВт	$I_x,$ %	$R, \text{ Ом}$			$X, \text{ Ом}$		
		ВН- СН	ВН- НН	СН- НН				ВН	СН	НН	ВН	СН	НН
АОДЦТН- 167/500/220	76 ст.	11	35	21,5	325	125	0,4	0,65	0,65	1,6	61,1	0	113,5
АТДЦТН- 250/220/110	76 ст.	11	33,4	20,8	–	145	0,5	0,2	0,2	0,4	25,5	0	45,1

Таблица 4

Параметры линий электропередач

Линия	Исходные данные								
	$U_{ном}, \text{ кВ}$	Марка провода	Кол-во цепей	Длина, км	$r, \text{ Ом}$	$x, \text{ Ом}$	$b, \text{ мкСм}$	$g, \text{ мкСм}$	
Шагол – Челябинская	500	3хАС-400	1	61,5	1,15	17,77	253	2,1	
Челябинская – Златоуст	500	3хАС-500	1	115	2,26	34,94	419	3,8	
Златоуст – Приваловская	500	3хАС-500	1	45	0,88	13,68	164	1,4	
Шагол – ЮУГРЭС2	500	3хАС-500	1	90	1,77	27,36	328	2,9	
Шагол – Козырево	500	3хАС-300	1	55	18,15	17,05	218	2,5	
Шагол – Курчатовская	500	3хАС-500	1	226	4,45	68,7	823	7,5	
Шагол 220 кВ – Новометаллургическая	220	АС-400	1	12	0,86	5,04	32	0,74	
Шагол 220 кВ – ЧТЭЦ-4	220	АС-400	2	10	0,36	2,1	54	1,2	
ЧТЭЦ-4 – Новометаллургическая	220	АС-400	2	6,3	0,22	1,32	34	0,77	
Шагол 220 кВ – Исаково	220	2хАС-500	2	57	0,65	6,9	298	2,5	
Шагол – ЮУГРЭС	220	2хАС-500	2	110	1,59	16,4	580	5,4	
Новометаллургическая – ЧТЭЦ-3	220	АС-400	4	2,8	0,05	0,29	30,2	0,69	
ЧТЭЦ-3 – Козырево 220	220	АС-400	2	16,7	0,6	3,5	90,2	2,06	

В табл. 4 приведены параметры линий электропередачи, рассматриваемой сети.

Исходя из данных табл. 4, средневзвешенное число часов использования максимальной нагрузки равно

$$T_{\text{ср.в}} = 5000 \cdot \frac{295}{2244} + 6000 \cdot \frac{200}{2244} + 4500 \cdot \frac{891}{2244} + 5000 \cdot \frac{101}{2244} + 5300 \cdot \frac{137}{2244} + 5250 \cdot \frac{450}{2244} + 5000 \cdot \frac{170}{2244} = 4959 \text{ ч.}$$

Время максимальных потерь за год:

$$\tau = \left(0,124 + \frac{4959}{10\,000}\right)^2 \cdot 8760 = 3366 \text{ ч.}$$

Тогда годовые потери составят

$$\delta \mathcal{E} = 65,5 \cdot 3366 = 220 \cdot 10^3 \text{ МВт} \cdot \text{ч.}$$

Таким образом, суммарные годовые потери электроэнергии в данной системе составят 220 тыс. МВт·ч.

#### Развитие сети с применением СТК

Статический тиристорный компенсатор (реактивной мощности) (СТК) или (Static Var Compensator (SVC)) – это многофункциональное статическое устройство, обеспечивающее стабилизацию напряжения и плавное или ступенчатое изменение

потребляемой и (или) выдаваемой им реактивной мощности на шинах его подключения [7].

Благодаря использованию СТК можно выровнять график нагрузки, уменьшить потери электроэнергии, повысить качество и увеличить пропускную способность линий [8].

Для установки СТК на (+200/–200 Мвар) выбран узел Шагол 220 кВ. В сложившемся режиме имеется избыток реактивной мощности, поэтому СТК будет работать в режиме потребления реактивной мощности.

На основании проведенного программой NetWorks анализа суммарные потери активной мощности составили 64 МВт, что на 1,5 МВт меньше. Новый режим сети указан на рис. 2.

Уменьшение потерь активной мощности при использовании СТК:

$$\delta P = P_n - P_k, \quad (4)$$

$$\delta P = 65,5 - 64,0 = 1,5 \text{ МВт.}$$

Снижение потерь электроэнергии за год составит:

$$\delta \mathcal{E} = \delta P \cdot \tau, \text{ МВт} \cdot \text{ч}, \quad (5)$$

$$\delta \mathcal{E} = 1,5 \cdot 3366 = 5049 \text{ МВт} \cdot \text{ч.}$$

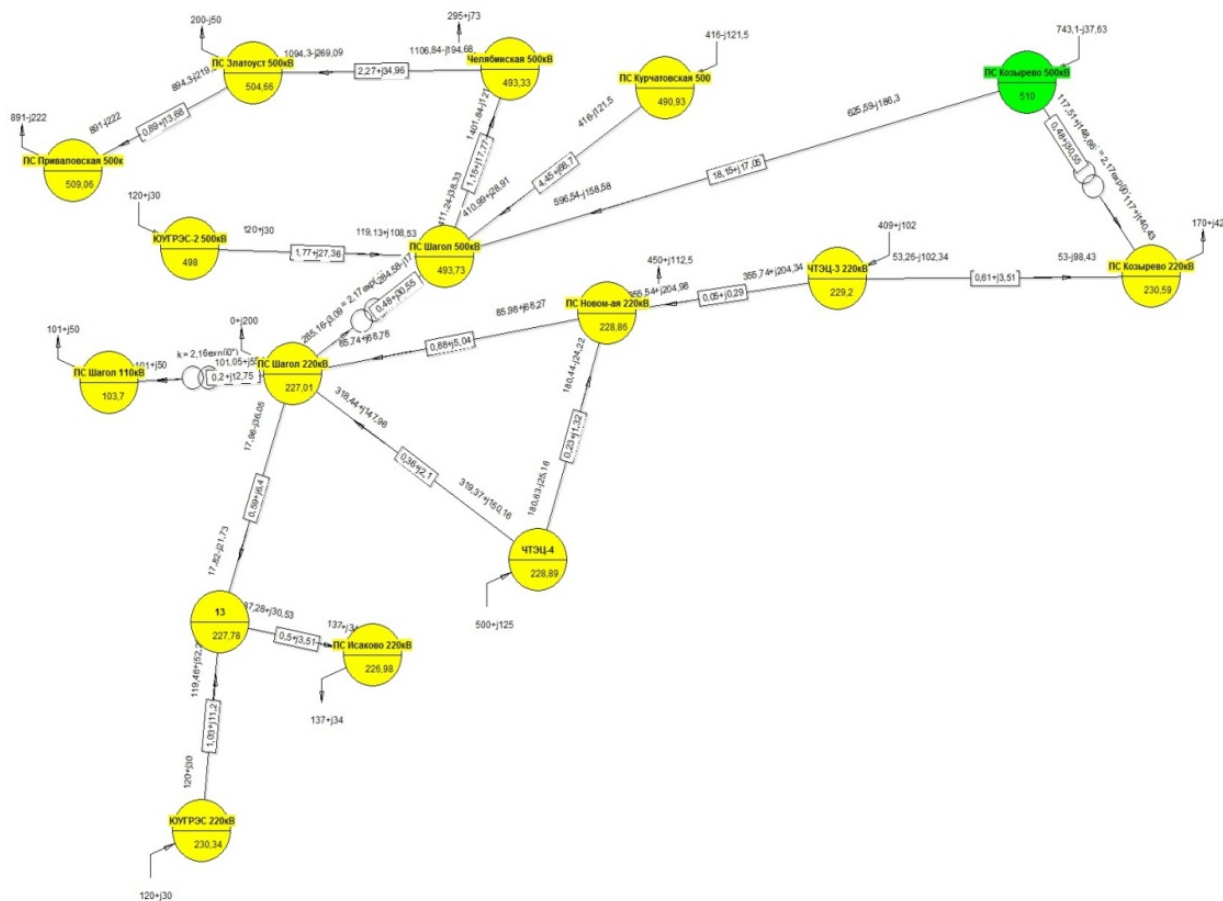


Рис. 2. Режим сети с применением СТК

## Развитие сети с применением БСК

БСК применяются для увеличения коэффициента мощности в электрических сетях. Они позволяют генерировать реактивную мощность в узлах нагрузки, а не на удаленных электрических станциях, что снижает потери напряжения и мощности в системе электроснабжения. Применяются в непосредственной близости к крупным узлам нагрузки со стороны высокого напряжения.

Мощность КБ при заданной емкости пропорциональна квадрату приложенного напряжения и частоте. Это значит, что мощность батареи конденсаторов падает со снижением приложенного напряжения, тогда как по условиям режима эту мощность необходимо увеличивать. Генерируемая мощность БСК регулируется ступенчато, путем подключения каждой секции через выключатель [6, 18].

Для установки БСК на (+200 Мвар) выбран узел Шагол 220 кВ.

В сложившемся режиме избыток реактивной мощности и генерация реактивной мощности в сеть только усугубят ситуацию.

На основании проведенного программой NetWorks анализа суммарные потери активной мощности составили 67,2 МВт. Новый режим сети показан на рис. 3.

Увеличение потерь активной мощности при использовании БСК:

$$\delta P = 65,5 - 67,1 = -1,6 \text{ МВт.}$$

Увеличение потерь электроэнергии за год составит:

$$\delta \mathcal{E} = -1,6 \cdot 3366 = -5385 \text{ МВт} \cdot \text{ч.}$$

Таким образом, использование БСК не принесет нам выгоды в сложившемся режиме в отличие от СТК, который обладает большей гибкостью в сети и позволяет генерировать или потреблять реактивную мощность.

## Развитие сети с применением управляемых УПК

УПК – это устройство, которое включается в линию последовательно и плавно изменяет ее реактивное сопротивление, позволяя оказывать воздействие на переток мощности по воздушной линии и изменять уровень напряжения в узлах [9, 10].

Устройство работает в следующих режимах.

1. Режим транзитной передачи. Тиристорный блок постоянно включен. Устройство ведет себя как параллельно работающие конденсатор и индуктивность.

2. Режим влияния индуктивности. В данном диапазоне преобладает индуктивное сопротивление устройства.

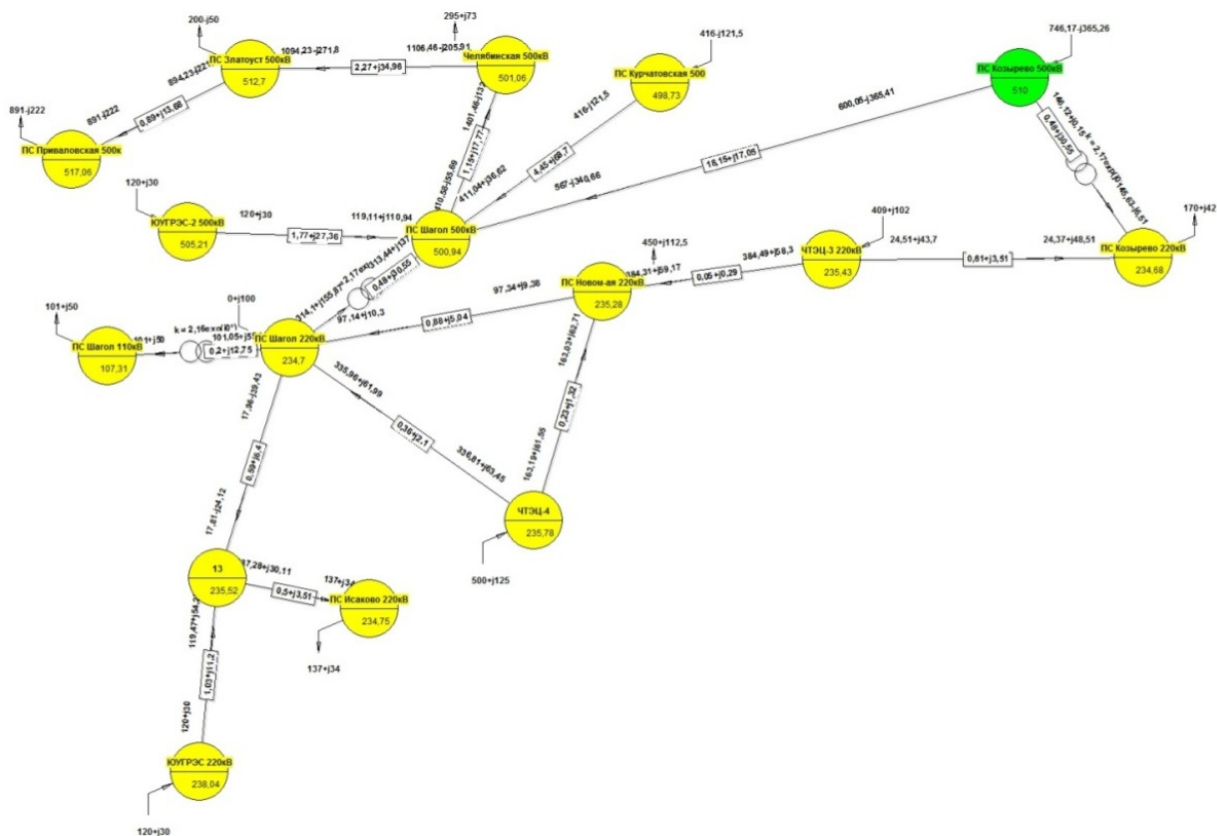


Рис. 3. Режим сети с применением БСК

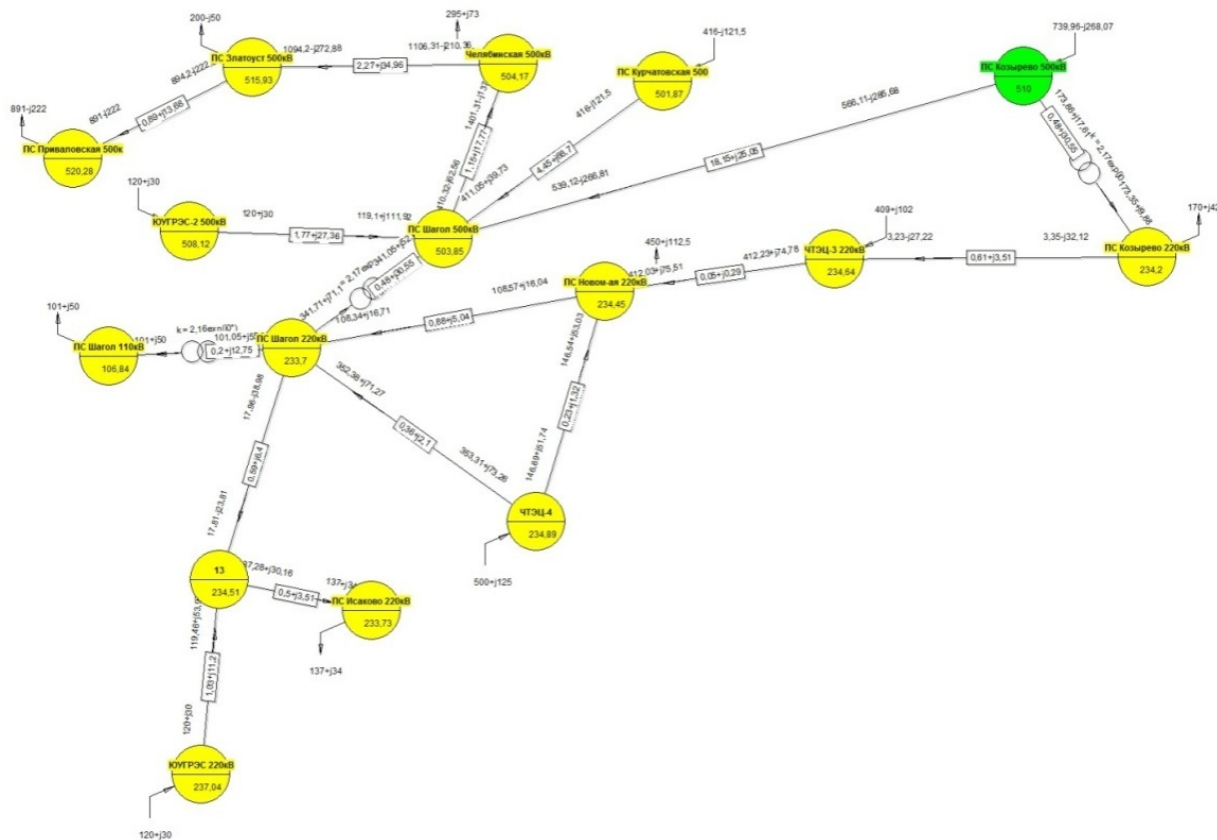


Рис. 4. Режим сети с применением УПК

3. Режим влияния емкости. В данном диапазоне преобладает емкостное сопротивление устройства.

4. Режим блокировки. Тиристорный блок переходит в непроводящее состояние и устройство ведет себя как чисто емкостное сопротивление.

В сложившемся режиме имеется избыток реактивной мощности, который передается по линии Шагол – Курчатовская. Для оптимизации режима необходимо уменьшить реактивную составляющую в линии. Для этого устройством УПК было увеличено реактивное сопротивление линии.

На основании проведенного программой NetWorks анализа суммарные потери активной мощности составили 60,9 МВт. Новый режим сети указан на рис. 4.

Снижение потерь активной мощности при использовании УПК:

$$\delta P = 65,5 - 60,9 = 4,6 \text{ МВт.}$$

Снижение потерь электроэнергии за год составит:

$$\delta \mathcal{E} = 4,6 \cdot 3366 = 15\,483,6 \text{ МВт} \cdot \text{ч.}$$

Из-за увеличения сопротивления линии реактивная составляющая была снижена и часть мощности была направлена через узлы Шагол – Ново-металлургическая – ЧТЭЦ-3 – Козырево, что позволило снизить потери.

## Аварийный режим работы с применением СТК

Рассмотрим аварийный режим работы при обрыве линии 500 кВ Шагол – Козырево. Подсчитаем и проанализируем результаты. Новый сетевой режим показан на рис. 5.

Из расчетов, проведенных программой NetWorks, видно, что напряжения на всех узлах превышают допустимые после разрыва участка цепи Шагол – Козырево. Если на подстанции 220 кВ Шагол установить устройство СТК, то можно избежать повышения напряжения до недопустимых значений в узлах.

Использование СТК в электрической сети позволит не только снизить потери в рабочем режиме сети, но и предотвратить негативные последствия аварийного режима. Новый сетевой режим показан на рис. 6.

## Практическая значимость

На основании компьютерного моделирования рассматриваемой электрической сети можно сделать вывод, что внедрение в эксплуатацию устройств FACTS позволяет изменять режим сети. Это положительно влияет на уменьшение потерь в электрической сети и позволяет скомпенсировать негативные последствия аварийного режима.

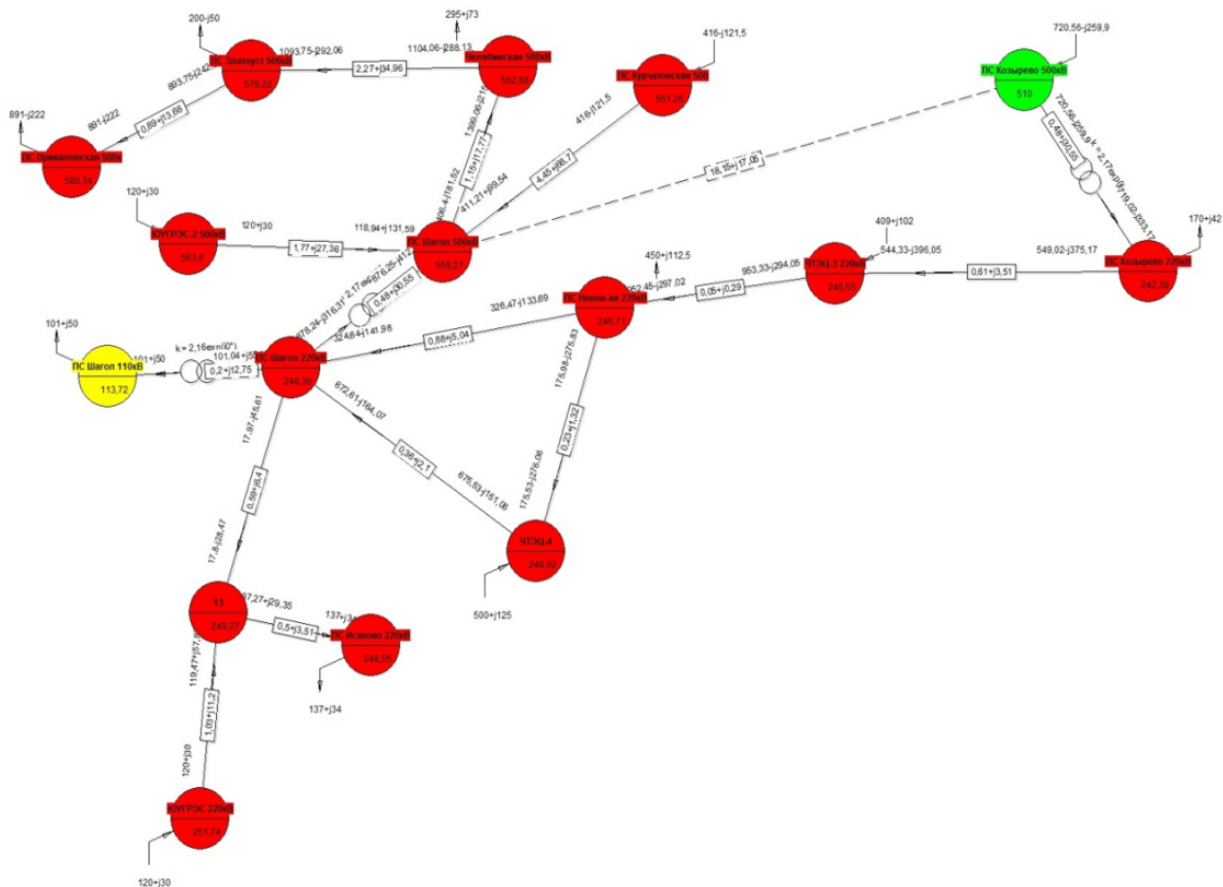


Рис. 5. Аварийный режим сети

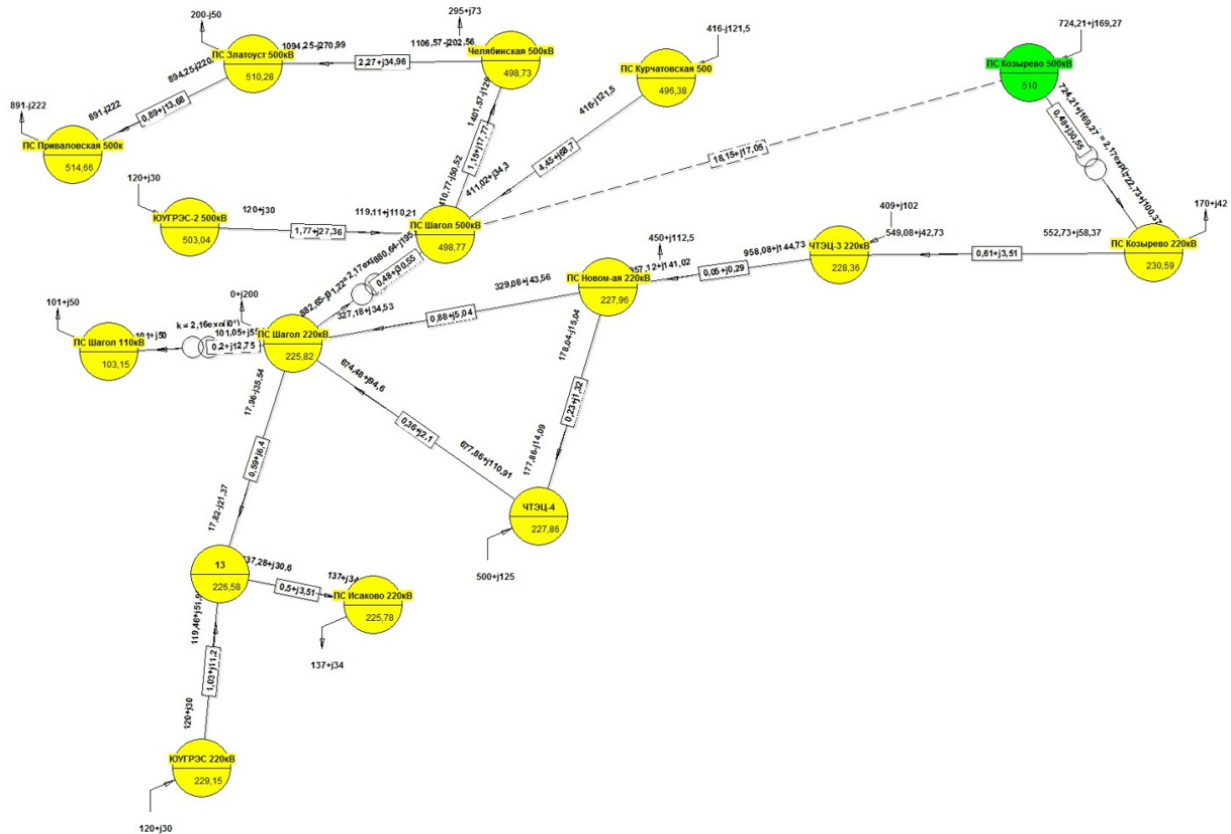


Рис. 6. Аварийный режим работы сети с применением СТК

### Заключение

Проведя расчеты и проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод, что СТК является наиболее эффективным средством управления режимом сети. Использование этого устройства позволит минимизировать негативное влияние аварийного режима и довести напряжения в узлах до допустимых значений. Устройство может как потреблять, так и генерировать реактивную мощность в зависимости от режима, что положительно сказывается на потерях и стабильности энергосистемы.

БСК дешевле в установке, но они обладают меньшей гибкостью в системе. Их установка оправдана при загрузке реактивной мощностью линии электропередачи.

УПК также оказался эффективным в этой ЭС, так как при его установке будут самые низкие потери в сети. После увеличения реактивного сопротивления линии распределение потоков реактивной мощности пошло по другим узлам, что позволило снизить нагрузку линии реактивной мощностью.

За рубежом активно внедряются устройства FACTS, они позволяют снизить расходы на производство и передачу электроэнергии, несмотря на дороговизну оборудования.

Таким образом, применение современных средств управления в ЭС является необходимым для ее развития в будущем, так как современные средства позволяют не только снизить потери в сети, но и оказать влияние на стабильность работы ЭС.

### Литература

1. Фортон, В.Е. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью / В.Е. Фортон, А.А. Макарова. – М.: ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», 2012. – 235 с.
2. Корсунов, П.Ю. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью / П.Ю. Корсунов, Ю.Г. Шакарян, Ю.И. Моржин. – М., 2011. – 290 с.
3. Воронин, Н.И. Интеллектуальные электроэнергетические системы: концепция, состояние, перспективы / Н.И. Воронин // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2011. – № 3 (20). – С. 11–16.
4. Дорофеев, В.В. Активно-адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России / В.В. Дорофеев, А.А. Макаров // Энергоэксперт. – 2009. – № 4. – С. 28–34.
5. Кобец, Б.Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid / Б.Б. Кобец, И.О. Волкова. – М.: ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.
6. Амелистов, Е.В. Основы современной энергетики: в 2 т. Т. 2: Современная электроэнергетика: учеб. для вузов / Е.В. Амелистова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Издат. дом МЭИ, 2010. – 632 с.

7. Flexible AC Transmission Systems (FACTS). – <https://www.electrical4u.com/facts-on-facts-theory-and-applications/> (дата обращения: 10.02.2021).
8. Padiyar, K.R. Flexible AC transmission systems: A status review / K.R. Padiyar, A.M. Kulkarni // *Sadhana*. – 1997. – Vol. 22. – P. 781–796. DOI: 10.1007/BF02745845
9. Yu, Q. Applications of flexible AC transmissions system (FACTS) technology in SmartGrid and its EMC impact / Q. Yu // 2014 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC). – 2014. DOI: 10.1109/ISEMC.2014.6899003
10. Andersen, Bjarne R. Flexible AC Transmission Systems. Series: CIGRE Green Books / Bjarne R. Andersen, Stig L. Nilsson. – Springer International Publishing, 2020. – 1117 p.
11. Comparative Review of Flexible Alternative Current Transmission System Devices in the Smart Grid / Fang Liu, Quan Tang, Ting Li et al. // 2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC). – 2019. DOI: 10.1109/CIEEC47146.2019.CIEEC-2019105
12. Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS) Devices / H.M. Lopes Ferreira, A. L'Abbate, G. Fulli, U. Hager // *Advanced Technologies for Future Transmission Grids*. – 2013. – P. 119–156. (Power Systems). Springer. DOI: 10.1007/978-1-4471-4549-3
13. Wall, Robert. Intelligent Application of Flexible AC Transmission System Components in an Evolving Power Grid / Robert Wall // *Theses and Dissertations*. – 2018. – No. 3043. – 68 p. – <https://scholarworks.uark.edu/etd/3043>.
14. Ravi Pratap Singh. Flexible AC Transmission System Controllers: A State of Art / Ravi Pratap Singh, S.K. Bharadwaj, R.K. Singh // *International Journal of Electronic and Electrical Engineering*. – 2014. – Vol. 7, no. 8. – P. 843–850.
15. Кочкин, В.И. Новые технологии повышения пропускной способности ЛЭП. Управляемая передача мощности / В.И. Кочкин // *Новости электротехники*. – 2007. – № 4 (46). – С. 2–6.
16. Ананичева, С.С. Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах: учеб. пособие / С.С. Ананичева, А.А. Алексеев, А.Л. Мызин; под ред. А.В. Паздерина. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 93 с.
17. Тиходеев, Н.Н. Передача электрической энергии / Н.Н. Тиходеев. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, ЛО, 1984. – 248 с.
18. Вороняй, Н.И. Разработка оборудования и систем управления крупных энергетических систем / Н.И. Вороняй, А.Б. Осак. – Иркутск, 2009. – 480 с.

**Кирпичникова Ирина Михайловна**, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; kirpichnikovaim@susu.ru.

**Горшков Константин Евгеньевич**, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; gorshkovke@susu.ru.

**Сабитов Руслан Валерьевич**, аспирант, кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; LPss1@yandex.ru.

Поступила в редакцию 19 февраля 2021 г.

---

DOI: 10.14529/power210206

## FLEXIBLE TRANSMISSION ELEMENTS FOR GRID OPTIMIZATION

**I.M. Kirpichnikova**, kirpichnikovaim@susu.ru,

**K.E. Gorshkov**, gorshkovke@susu.ru,

**R.V. Sabitov**, LPss1@yandex.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The article dwells upon optimizing, reduction of losses in, and improving the stability of grids by implementing devices that affect the parameters and power flows in a grid. State-of-the-art technology for better control is crucial for the development of electric power systems. FACTS technologies or flexible alternating current transmission systems, essentially transform the grid from a passive electricity transport into a device that actively controls the grid parameters. The article analyzes the development of a 500/220/110 kV grid that uses parameter-affective devices: SVC, BSK, LCD. Steady-state parameters, active power losses, and electric power losses



were calculated for a year before and after the devices were deployed. Each device was therefore analyzed for effectiveness. The parameters of the SVC-equipped 500/220/110 kV grid were calculated for emergency operation with the 500 kV line being offline. Thus, the paper also analyzes the emergency performance of the SVC.

*Keywords: emergency mode, controlled power lines, efficiency increase, power flow distribution, loss reduction, system stability increase, optimization.*

### References

1. Fortov V.E., Makarov A.A. *Kontsepsiya intellektual'noy elektroenergeticheskoy sistemy Rossii s aktivno-adaptivnoy set'yu* [The concept of an intelligent electric power system in Russia with an active-adaptive network]. Moscow, JSC "STC FGC UES" Publ., 2012. 235 p.
2. Korsunov P.Yu., Shakaryan Yu.G., Morzhin Yu.I. *Kontsepsiya intellektual'noy elektroenergeticheskoy sistemy s aktivno-adaptivnoy set'yu* [The concept of an intelligent electric power system with an active-adaptive network]. Moscow, 2011. 290 p.
3. Voropay N.I. [Intelligent electric power systems: concept, state, prospects]. *Avtomatizatsiya i IT v energetike* [Automation and IT in power engineering], 2011, no. 3 (20), pp. 11–16. (in Russ.)
4. Dorofeev V.V., Makarov A.A., Dorofeev V.V., Makarov A.A. [Actively adaptive network is a new quality of the UES of Russia]. *Energoexpert*, 2009, no. 4, pp. 28–34. (in Russ.)
5. Kobets B.B., Volkova I.O. *Innovatsionnoye razvitiye elektroenergetiki na baze kontseptsii Smart Grid* [Innovative development of the electric power industry based on the Smart Grid concept]. Moscow, IAC Energiya Publ., 2010. 208 p.
6. Ametistov E.V. *Osnovy sovremennoy energetiki* [Fundamentals of modern energy]. 5th ed., Rev. and add. Moscow, Publishing house MEI, 2010. 632 p.
7. *Flexible AC Transmission Systems (FACTS)*. Available at: <https://www.electrical4u.com/facts-on-facts-theory-and-applications/> (accessed 03.02.2021).
8. Padiyar K.R., Kulkarni A.M. Flexible AC transmission systems: A status review. *Sadhana*, 1997, vol. 22, pp. 781–796. DOI: 10.1007/BF02745845
9. Yu. Q. Applications of flexible AC transmissions system (FACTS) technology in SmartGrid and its EMC impact. *2014 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), 2014*. DOI: 10.1109/ISEMC.2014.6899003
10. Bjarne R. Andersen, Stig L. Nilsson. *Flexible AC Transmission Systems*. Series: CIGRE Green Books, Springer International Publishing, 2020. 1117 p.
11. Fang Liu, Quan Tang, Ting Li, Weiting Xu, Jin Gou, Kai Li. Comparative Review of Flexible Alternative Current Transmission System Devices in the Smart Grid. *2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*. DOI: 10.1109/CIEEC47146.2019.CIEEC-2019105
12. Lopes Ferreira H.M., L'Abbate A., Fulli, G., Hager U. Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS) Devices. *Advanced Technologies for Future Transmission Grids*, 2013, pp. 119–156. (Power Systems). Springer. DOI: 10.1007/978-1-4471-4549-3
13. Wall Robert. Intelligent Application of Flexible AC Transmission System Components in an Evolving Power Grid. Theses and Dissertations, 2018, no. 3043. 68 p. Available at: <https://scholarworks.uark.edu/etd/3043>.
14. Ravi Pratap Singh, Bharadwaj S.K., Singh R.K. Flexible AC Transmission System Controllers: A State of Art. *International Journal of Electronic and Electrical Engineering*, 2014, vol. 7, no. 8, pp. 843–850.
15. Kochkin V.I. [New technologies for increasing the transmission capacity of power lines. Controlled power transmission]. *Novosti elektrotehniki* [News of electrical engineering], 2007, no. 4 (46), pp. 2–6. (in Russ.)
16. Ananicheva S.S., Alekseev A.A., Myzin A.L. *Kachestvo elektroenergii. Regulirovaniye napryazheniya i chastoty v energosistemakh: ucheb. posobiye* [Power quality. Regulation of voltage and frequency in power systems], Ekaterinburg, UrFU Publ., 2012. 93 p.
17. Tikhodeev N.N. *Peredacha elektricheskoy energii* [Electric power transmission]. 2<sup>nd</sup> ed., rev. and add. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1984. 248 p.
18. Voropai N.I., Osak A.B. *Razrabotka oborudovaniya i sistem upravleniya krupnykh energeticheskikh sistem* [Development of equipment and control systems for large energy systems]. Irkutsk, 2009. 480 p.

Received 19 February 2021

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Кирпичникова, И.М. Оптимизация работы электрической сети с применением элементов гибких передач / И.М. Кирпичникова, К.Е. Горшков, Р.В. Сабитов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 53–61. DOI: 10.14529/power210206

### FOR CITATION

Kirpichnikova I.M., Gorshkov K.E., Sabitov R.V. Flexible Transmission Elements for Grid Optimization. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 53–61. (in Russ.) DOI: 10.14529/power210206