

УДК 620.9.001.5

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ И СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ

**Ю.П. Кубарьков, И.С. Кулаев**

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

*В современных системах электроснабжения дерегулирование и реструктуризация создали повышенный интерес к планированию распределенных ресурсов, так как они играют важную роль в повышении операционной эффективности. Системы распределения постоянно сталкиваются с растущими требованиями потребителей и, как правило, работают на грани перегрузок. При работе системы распределения в таких критических условиях интеграция распределенных ресурсов повышает надежность электроснабжения путем повышения стабильности напряжения и снижения потерь мощности. Таким образом, для того чтобы повысить качество и надежность питания в сетях, должны быть обеспечены оптимальный объем и расположение распределенных ресурсов.*

**Ключевые слова:** система распределения, планирования ресурсов, предельные нагрузочная способность, потери мощности, стабильность напряжения.

Проблема стабильности напряжения возникла с началом развития активно-адаптивных сетей с распределенной генерацией из-за большой разницы в мощности источников и требований нагрузки, а также ограниченного расширения систем распределения из-за высокой инвестиционной стоимости оборудования. В целях удовлетворения спроса нагрузки, как правило, приходится интегрировать распределенные ресурсы в существующую систему. Распределенные ресурсы (источники активной мощности АГ или батареи статических конденсаторов БСК) при оптимальном расположении и управлении позволяют отложить или ограничить системные обновления за счет повышения энергоэффективности таких параметров, как уровни напряжения, потери мощности и допустимые пределы загрузки оборудования [1]. Однако в большинстве случаев именно достижение стабильности напряжения является серьезной проблемой, поскольку она позволяет повысить надежность электроснабжения потребителей.

### Математические формулировки

Для расчета и оценки параметров режима рассмотрим радиальную электрическую сеть, представленную на рис. 1. Для этой сети, имеющей  $N$  узлов,  $S_N$  представляет исходный узел и  $i$  – любой промежуточный узел.

В радиальной распределительной сети потоки мощности обычно вычисляются с использованием набора обобщенных рекурсивных уравнений. Поэтому уравнение для активной мощности выглядит следующим образом:

---

*Юрий Петрович Кубарьков (д.т.н., профессор), профессор кафедры «Электрические станции».*

*Игорь Сергеевич Кулаев, студент.*

$$P_{i+1} = P_i - P_{\text{пот},i} - P_{Li+1}.$$

Аналогично уравнение для реактивной мощности может быть получено как

$$Q_{i+1} = Q_i - Q_{\text{пот},i} - Q_{Li+1} = Q_i - x_i * \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} - Q_{Li+1}.$$

Уравнение для напряжения в соответствующем узле определяется следующим образом:

$$|V_{i+1}|^2 = |V_i|^2 + \frac{r_i^2 + x_i^2}{|V_i|^2} (P_i^2 + Q_i^2) - 2 * (r_i P_i^2 + x_i Q_i^2).$$

Кроме того, потери мощности в линии между двумя узлами рассчитывается как

$$P_{\text{ном}}(i, i + 1) = r_i \frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{|V_i|^2}.$$

Для того чтобы оценить стабильность напряжения в сети, нужно знать возможную нагрузку, которая может быть подключена к соответствующему узлу. Это может быть определено по коэффициенту нагрузки:

$$LF_{i+1} = \frac{v_i^2}{2 * (x_i P_i + r_i Q_i)^2} * \left[ -(r_i P_i + x_i Q_i) + \sqrt{(r_i^2 + x_i^2)(P_i^2 + Q_i^2)} \right].$$

Коэффициент нагрузки узла  $i+1$  зависит от спроса, поэтому он может меняться в зависимости от расположения распределенных источников.

Тем не менее размещение источника активной или реактивной мощности в конкретном узле не гарантирует одновременного улучшения других параметров, определяющих энергоэффективность [2].

Для оптимального размещения дополнительной генерации  $P$  и  $Q$  с целью повышения стабильности напряжения в узлах может быть использован итерационный метод расчета режимов в разомкнутых распределительных сетях.

### Определение размещения распределенных ресурсов

Для оценки мест установки АГ и БСК был использован фрагмент электрической сети напряжением 6 кВ с радиальной топологией и 12 узлами (см. рис. 1). Напряжение на питающей подстанции принято  $U_{\text{ном}} = 6,3$  кВ, нагрузки фиксированной мощности.

При расчете режима работы приняты следующие ограничения [3, 4]:

1. В случае АГ считается, что источник работает с коэффициентом мощности, равным единице, что определяет максимальный КПД. При высокой стоимости активной мощности это обеспечивает максимальную загрузку производственных мощностей.
2. Максимальная активная мощность генерации в конкретном узле не превышает общую мощность нагрузки в этом узле.
3. Компенсация реактивной мощности размещается в тех же узлах, что и локальная генерация, которая является более дорогостоящей, чем централизованная поставка.
4. При планировании принимается, что распределенная генерация доступна для размещения в каждом узле в любое время.
5. Окончательное местоположение АГ и БСК выбирается исходя из максимального значения целевой функции по коэффициенту нагрузки.

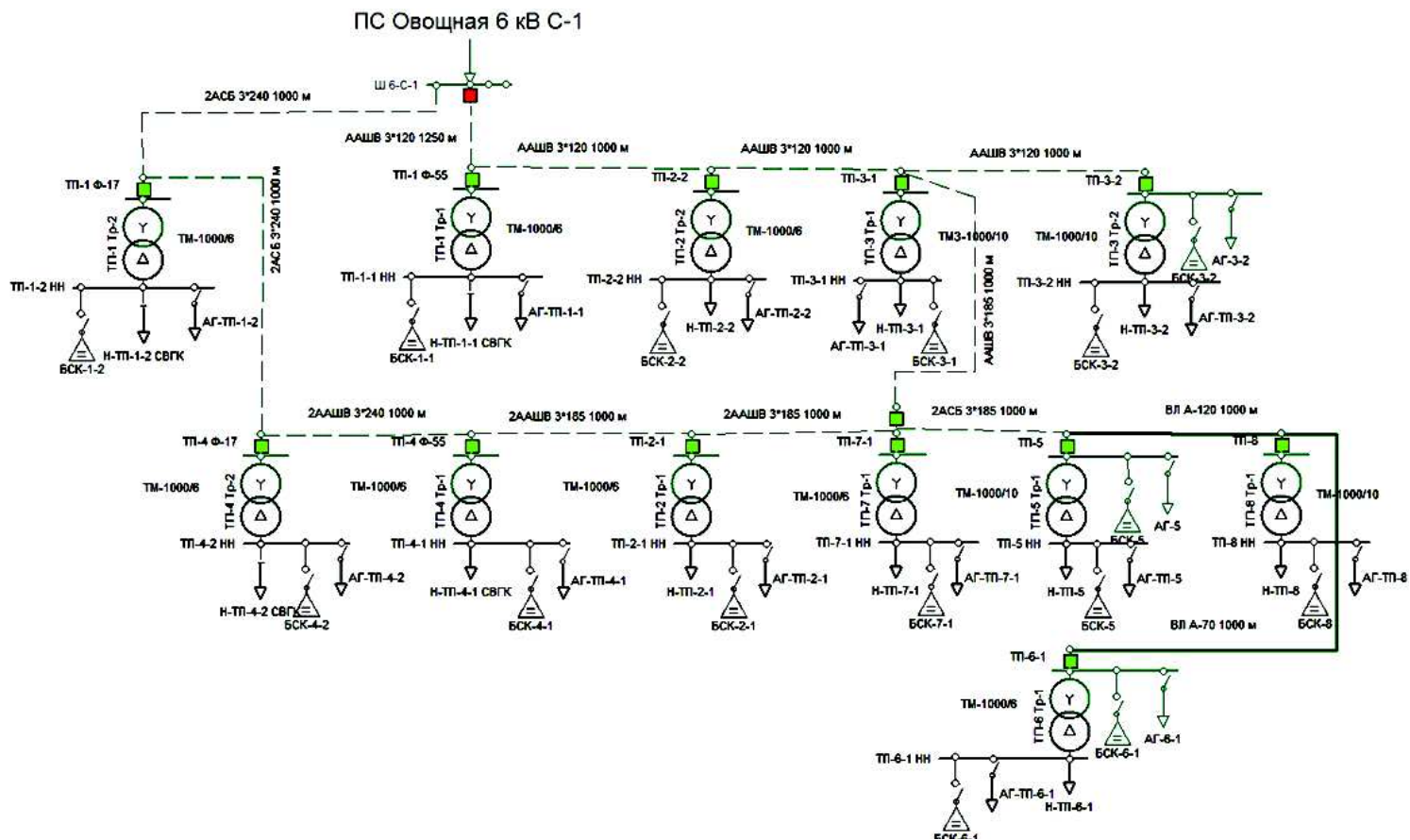


Рис. 1. Фрагмент электрической сети напряжением 6 кВ с радиальной топологией

### Анализ результатов расчета

Анализ результатов расчета режима для базового варианта показал, что минимальный уровень напряжения, увеличенные потери мощности и минимальный нагрузочный предел будут в узле 9, 12. Для улучшения этих параметров рассмотрим варианты оптимального размещения распределенных источников активной (АГ) и реактивной (БСК) мощности [5, 6].

При установке БСК (рис. 2) максимальный уровень компенсации ограничивается оптимальным уровнем  $\cos \phi$  источника питания и уровнем потерь мощности в сети. Уровень компенсации  $3 \cdot 900$  квар переходит в режим перекомпенсации с увеличением потерь электроэнергии с 5,8 до 6,2 %, поэтому компенсация  $3 \cdot 300$  квар является предельной. Установка распределенных генераторов (рис. 3) может обеспечить почти номинальный уровень напряжения в узлах сети. С другой стороны, установка распределенной генерации на уровне  $3 \cdot 1000$  кВт (рис. 4) может быть неэффективной с точки зрения экономической окупаемости.

Таким образом, при управлении режимом работы в распределительных системах необходимо контролировать величину и расположение распределенных ресурсов для улучшения стабильности напряжения при изменении нагрузки с учетом экономической целесообразности.

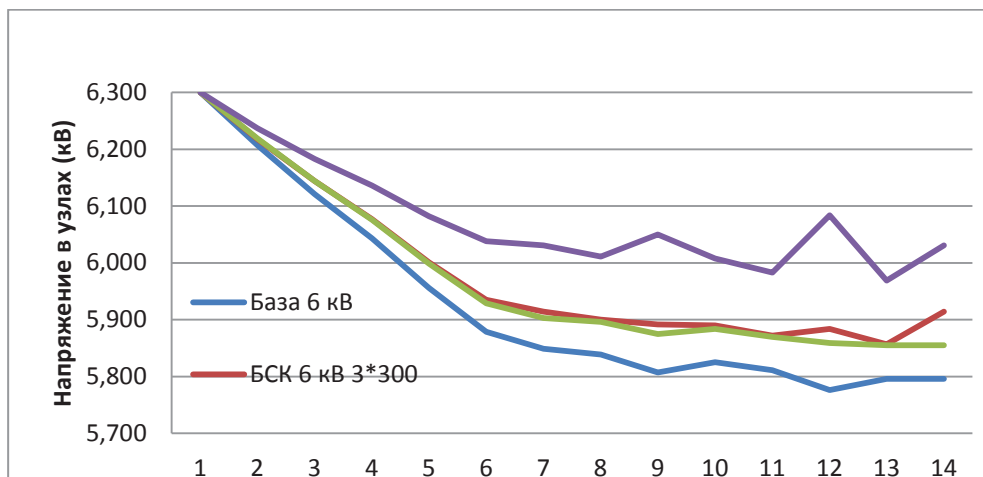


Рис. 2. Уровни напряжения в узлах на стороне 6 кВ при установке БСК

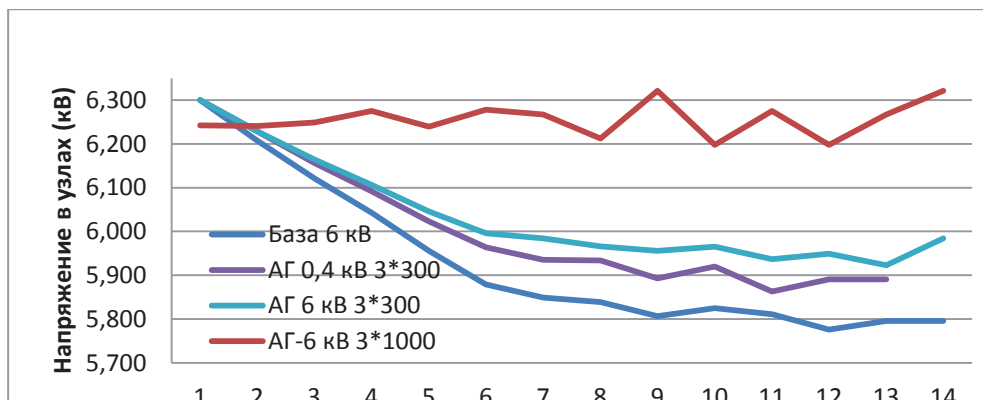


Рис. 3. Уровни напряжения в узлах на стороне 6 кВ при установке АГ

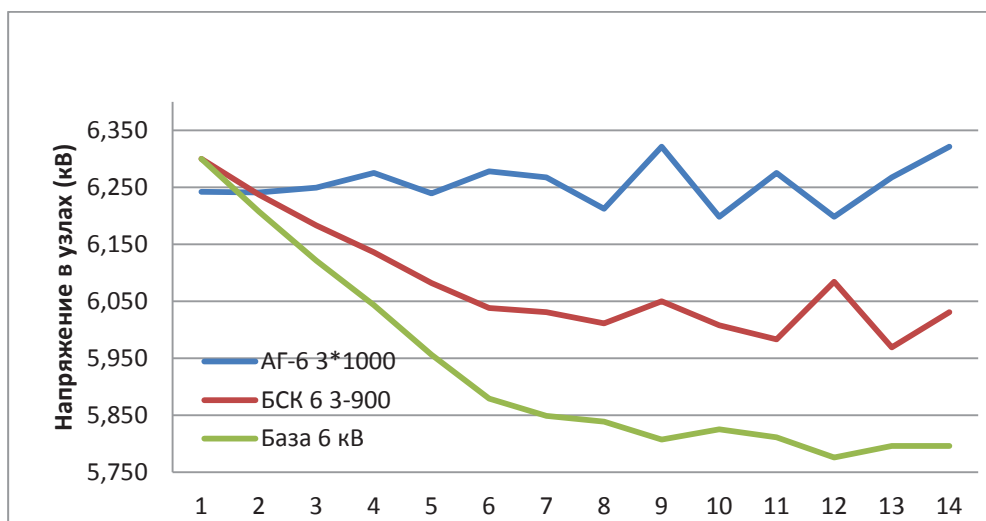


Рис. 4. Уровни напряжения в узлах на стороне 6 кВ при установке БСК или АГ оптимальной мощности

### Выводы

1. Оптимальное размещение распределенных ресурсов, ориентированных на уменьшение потерь мощности, не гарантируют повышения стабильности напряжения в системе.

2. Получение размера и местоположения ресурса для разных профилей напряжения приводит к тому, что потери мощности и уровни напряжения не коррелируют.

3. Стабильность напряжения при удовлетворении спроса мощности зависит от коэффициента загрузки в каждом узле и предельной нагрузки, которая определяется для худших условий.

4. Требуется одновременное улучшение этих параметров для стабильной работы. Это позволит обеспечить повышенную надежность электроснабжения для максимального количества потребителей, однако необязательно при минимизации потерь мощности.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ikkal Ali, Mini S. Thomas, Pawan Kumar.* Effect of loading pattern on the performance of reconfigured medium size distribution system, Proc. of fifth IEEE Power India Conference, 2012, DOI: 10.1109 / Power I. 2012. 6479503.
2. *Martins V.F., Borges C.L.T.* Active Distribution Network Integrated Planning Incorporating Distributed Generation and Load Response Uncertainties, IEEE Trans. Power Systems, vol. 26, no. 4, pp. 2164-2172, Nov. 2011.
3. *Su S. Yi, Chan-Nan Lu, Chang R.F., Alcaraz G.G.* Distributed Generation Interconnection Planning: A Wind Power Case Study, IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 2, no. 1, pp. 181-189, March 2011.
4. *Ghosh S., Sherpa K.S.* An efficient method for load-flow solution of radial distribution networks, Int. J. Elect. Power Energy Syst. Eng., vol. 1, no. 2, pp. 108–115, 2008.
5. *Jasmon G.B., Lee L.H.C.C.* Distribution Network Reduction for Voltage Stability Analysis and Load Flow Calculations, Electric Power and Energy System, vol. 13, pp. 9-13, 2003.
6. *Гольдштейн В.Г., Кубарьков Ю.П., Макаров Я.В.* Сохранение стабильного уровня напряжения в сетях с помощью мультиагентных систем // Электрооборудование – эксплуатация и ремонт. – 2015. – № 8. – С. 42-49.

Статья поступила в редакцию 27 января 2016 г.

## REINFORCEMENT OF DISTRIBUTION NETWORKS TO IMPROVE STABILITY OF VOLTAGE AND TO DECREASE POWER LOSS

***Y.P. Kubarkov, I.S. Kulaev***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*In modern systems, electricity deregulation and restructuring have created an increased interest in the planning of distributed resources, as they play an important role in improving operational efficiency. Distribution systems are constantly faced with ever-increasing demands of consumers and, as a rule, work on the verge of overload. When the distribution system is in critical conditions, the integration of distributed resources increases the reliability of power supply by increasing the voltage stability and reduce power loss. Thus, in order to improve the quality and reliability of power supply networks, must be provided with an optimum size and location of the allocated resources.*

**Keywords:** *distribution system, resource planning, the limit load capacity, power loss, voltage stability.*