Федюкович Н.С.

Анализ эффективности ряда технических мероприятий повышения пропускной способности воздушных линий напряжением 10кВ

(Россия, Красноярск)

doi: 10.18411/sr-10-04-2019-81

idsp: sciencerussia-10-04-2019-81

Научный руководитель: Герасименко А.А.

Распределительные сети являются наиболее массовыми и разветвлёнными. Главная их особенность – непосредственная связь с потребителями электроэнергии, особое место среди которых занимают ответственные и социально значимые потребители, ненадлежащее качество электроснабжения которых может привести к экономическим и социальным последствиям. Поэтому необходимо обеспечить достаточную пропускную способность распределительных сетей, которая напрямую влияет на качество электроснабжения потребителей.

В данной работе рассматриваются пути повышения пропускной способности воздушных линий (ВЛ) распределительных электрических сетей с учётом классических технических ограничений по нагреванию и потере напряжения. Под пропускной способностью электропередачи понимается её наибольшая передаваемая активная мощность трёх фаз в установившемся режиме, определённая с учётом режимно-технических ограничений [1,2]. Первое ограничение связано с необходимостью обеспечения условий регулирования или улучшения напряжения и, в конечном итоге, обеспечения нормируемых отклонений напряжения на зажимах электропотребителей и электроустановок и при заданной электрической нагрузке определяется длиной линии. Второе ограничение, связанное с термической устойчивостью (нагреванием) проводов, определяется током нагрузки и обусловлено сохранением электрических контактов, изоляции проводов и габаритов линии, и не зависит от её длины.

В итоге наибольшая мощность (пропускная способность) линии электропередачи определяется из условия:

$$P_{нб} = \min \{ P_U, P_{т.у.} \}.$$

где $P_U, P_{т.у.}$ – наибольшая мощность, допустимая по режиму напряжения и термической устойчивости соответственно.

Ниже выполняется анализ эффективности ряда технических (затратных) мероприятий повышения пропускной способности линии:

1. Влияние конструкции распределительных линий на величины предельных передаваемых мощностей;
2. Изменение конструкции линии. Переход к линии с самонесущими изолированными проводами со сближенными фазами – ВЛИ 10 кВ;
3. Увеличение площади сечения провода на одну стандартную ступень;
4. Переход линий на повышенное напряжение (20 кВ);
5. Компенсация реактивных нагрузок;
6. Режим натуральной мощности.

1. Влияние конструкции распределительных линий на величины предельных передаваемых мощностей. Для оценки эффективности предлагаемых мероприятий рассмотрим линию при различной её протяжённости. В качестве основы для сопоставления примем линию с наименьшим по экономической целесообразности сечением провода марки А 35 с горизонтальным расположением фаз, расстояние между

фазами $D = 80$ см. Принимаем коэффициент мощности нагрузки $\operatorname{tg} \varphi = 0,75$, допустимую потерю напряжения $\Delta U_{\text{доп}} = 7,0\%$.

Схемно-конструктивные параметры линии. При горизонтальном расположении проводов среднее геометрическое расстояние составит:

$$D_{cp} = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{ac}} = 1,26 \cdot D = 1,26 \cdot 80 \approx 101 \text{ см}.$$

Соответственно имеем погонное индуктивное сопротивление

$$x_0 = 0,144 \lg \frac{D_{cp}}{r_{np}} + 0,016 \mu = 0,144 \lg \frac{101}{0,375} + 0,016 \cdot 1 = 0,366 \text{ Ом / км},$$

По данным [2, табл. П. 1.9] для провода марки А 35 активное сопротивление составляет $r_0 = 0,92$ Ом / км, допустимая токовая нагрузка $I_{\text{доп}} = 170$ А;

r_{np} – расчётный радиус провода 35 мм²

Наибольшие мощности ВЛ по режиму напряжения и термической устойчивости, соответственно, вычисляются по формулам:

$$P_U = \frac{U_{\text{ном}} \cdot \Delta U_{\text{доп}}}{(r_0 + \operatorname{tg} \varphi \cdot x_0) \cdot L}; \quad (1)$$

$$P_{\text{т.у.}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{доп}} \cdot \cos \varphi \cdot 10^{-3}; \quad (2)$$

Выделим граничную длину, определяемой из условия равенства ($P_U = P_{\text{т.у.}}$) предельных мощностей по нагреванию и потере напряжения. В соответствии с полученными результатами (табл.1), пропускная способность линии протяжённостью менее 2,5 км ограничивается допустимым нагреванием, при большей длине – режимом напряжения.

Таблица 1

Пропускная способность ВЛ напряжением 10 кВ традиционного исполнения

Длина линии, км	Предельная мощность линии по режиму напряжения, МВт	Предельная мощность линии по термической устойчивости, МВт
2,49*	2,350	2,350
3,00	1,953	
5,00	1,172	
...	...	
15,0	0,391	

*граничная длина ВЛ

2. Изменение конструкции линии. Переход к линии с самонесущими изолированными проводами со сближенными фазами – ВЛИ 10 кВ. В данном случае появляется возможность уменьшить междуфазное расстояние D с 80 – 90 см до 50 – 55 см с горизонтальным расположением фаз на железобетонных опорах. Уменьшение междуфазных расстояний и, следовательно, рост магнитного взаимодействия фаз, и соответственно меньшее проявление ЭДС самоиндукции приводит к снижению индуктивного сопротивления линии. Так, при горизонтальном расположении проводов уменьшается среднее геометрическое расстояние:

$$D_{cp} = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{ac}} = 1,26D = 1,26 \cdot 55 = 69,3 \text{ см}$$

и соответственно – погонное индуктивное сопротивление:

$$x_0 = 0,144 \lg \frac{D_{cp}}{r_{np}} + 0,016 \mu = 0,144 \lg \frac{69,3}{0,375} + 0,016 \cdot 1 = 0,342 \text{ Ом / км},$$

По данным [3] для защищённого изоляцией провода СИП-3, выполненного уплотнёнными проволоками из алюминиевого сплава, с площадью сечения 35 мм^2 активное сопротивление составляет $r_0 = 0,99 \text{ Ом/км}$, допустимый по нагреванию ток $I_{\text{доп}} = 200 \text{ А}$.

Таблица 2

Пропускная способность ВЛИ 10 кВ

Длина линии, км	Предельная мощность ВЛИ 10 кВЗ по режиму напряжения, МВт	Предельная мощность ВЛИ 10 кВ по термической устойчивости, МВт
2,12*	2,770	2,770
3,00	1,872	
5,00	1,123	
...	...	
15,0	0,374	

*граничная длина ВЛ

В соответствии с полученными результатами, пропускная способность для рассмотренных линий определяется (ограничена) режимом напряжения. Следует отметить, что длительно допустимая по нагреванию сила тока (а, следовательно, и мощность) провода с изоляционным покровом СИП-3 существенно больше ($200 \text{ А} > 170 \text{ А}$), чем голого провода марки А 35, по причине принятия большей нормативной температуры нагревания провода, обусловленное применением вместо витых проволок из электротехнического алюминия токопроводящих жил с уплотнением проволок из алюминиевого сплава с повышенной термостойкостью изоляции из сшитого светостабилизированного полиэтилена. Данное техническое мероприятие увеличивает наибольшую мощность, определяемую термической устойчивостью в 1,15 раз. Пропускная способность ВЛИ 10 кВ линий оказалась несколько меньше, чем линий традиционного исполнения, по причине большего проявления активного сопротивления ($P_v^{\text{СИП-3}} / P_v^{\text{А35}} = 0,96$). Однако основное преимущество линии с одиночными проводами, защищёнными изоляцией, связано с её повышенными надёжными свойствами: возможность замыканий резко снижается [1].

3. Увеличение площади сечения провода на одну стандартную ступень. Оценим эффективность данного технического мероприятия, заменив провод А 35 на А 50.

Погонное индуктивное сопротивление линии вычисляется по формуле:

$$x_0 = 0,144 \lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{пр}}} + 0,016 \mu = 0,144 \lg \frac{101}{0,525} + 0,016 \cdot 1 = 0,345 \text{ Ом/км}.$$

По данным [2, табл. П. 1.9], для провода марки А 50 активное сопротивление составляет $r_0 = 0,65 \text{ Ом/км}$, при допустимой токовой нагрузке $I_{\text{доп}} = 210 \text{ А}$.

Соответствующее увеличение пропускной способности ВЛ по данным из (1) и (2) представлено в табл. 3.

Таблица 3

Пропускная способность ВЛ напряжением 10 кВ традиционного исполнения, выполненной проводом А 50

Длина линии, км	Предельная мощность ВЛ 10 кВ по режиму напряжения, МВт	Предельная мощность ВЛ 10 кВ по термической устойчивости, МВт
2,65*	2,910	2,910
3,00	2,568	
5,00	1,541	
...	...	
15,0	0,514	

*граничная длина ВЛ

В результате пропускная способность для линии протяжённостью менее 2,6 км определяется (ограничена) допустимым нагреванием, при большей длине – режимом напряжения. Данное техническое мероприятие увеличивает пропускную способность ВЛ протяжённостью менее 2,6 км в 1,05 раз, а протяжённостью более 2,6 км – в 1,31 раз.

4. Переход линий на повышенное напряжение (20 кВ). Данное решение является наиболее универсальным и экономически целесообразным при электроснабжении объектов с большей плотностью электрических нагрузок или при передаче сравнительно небольших мощностей на большие расстояния. Указанный переход наиболее естественен и целесообразен при выполнении воздушных линий 20 кВ изолированными проводами. В этом случае конструктивные параметры линий с изолированными проводами (ВЛИ-20 кВ) соответствуют параметрам ВЛ 10 кВ традиционного исполнения. Появляется возможность уменьшить расстояние между фазами с двух до одного метра, оставаясь в габаритах линии 10 кВ. В этих условиях среднегеометрическое расстояние между фазами составит:

$$D_{cp} = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{ac}} = 1,26D = 1,26 \cdot 100 = 126 \text{ см}.$$

Соответственно индуктивное сопротивление линии с изолированным проводом площадью сечения 35 мм^2 определяется в виде:

$$x_0 = 0,144 \lg \frac{D_{cp}}{r_{np}} + 0,016 \mu = 0,144 \lg \frac{126}{0,375} + 0,016 \cdot 1 = 0,380 \text{ Ом / км}.$$

Для полноты оценки эффективности данного мероприятия вычислим длину ВЛИ 20 кВ, при которой будет соблюдаться равенство $(P_U^{20\text{кВ}} = P_{m.y.}^{10\text{кВ}})$.

Таблица 4

Оценка эффективности перехода на повышенное напряжение 20 кВ

Длина линии, км	Предельная мощность ВЛИ 20 кВ по режиму напряжения, МВт	Предельная мощность ВЛИ 20 кВ по термической устойчивости, МВт
1,98*	5,540	5,540
3,00	3,660	
4,67**	2,350	
5,00	2,196	
...	...	
15,0	0,732	

*граничная длина ВЛ;

**длина ВЛ, при которой выполняется условие $(P_U^{20\text{кВ}} = P_{m.y.}^{10\text{кВ}})$

По данным таблицы 4, пропускная способность для линий протяжённостью менее 2,0 км определяется (ограничена) допустимым нагреванием. Для линий длиной более 2,0 км – режимом напряжения. Переход на повышенное напряжение позволяет увеличить пропускную способность ВЛ длиной меньшей, чем граничная, в 2,36 раз, а для ВЛ протяжённостью большей, чем граничная – в 1,87 раз. В результате анализа возможностей линий с проводами малых площадей сечений установлено, что ВЛИ-20 кВ по пропускной способности приближается к ВЛ 35 кВ традиционного исполнения. В итоге отметим, что номинальное напряжение 20 кВ введено в стандарт (решением Комитета стандартов СССР) ещё в начале 60-х годов. Эффективность его применения обсуждалась в ряде научных публикаций. Однако только в последние годы в связи с переходом к линиям с изолированными проводами использование напряжения 20 кВ становится эффективным во многих аспектах. В частности, можно отметить

возможность сокращения одной ступени трансформации в процессе распределения электрической энергии [1].

5. Компенсация реактивных нагрузок. В сетях напряжением 10 кВ экономически целесообразна практически полная компенсация реактивных нагрузок посредством конденсаторных батарей (КБ), при которой предельная передаваемая мощность по режиму напряжения ВЛ определяется по выражению:

$$P_U = \frac{\Delta U_{\text{доп}} \cdot U_{\text{ном}}}{r_0 \cdot L}$$

Соответствующие результаты представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1.

Пропускная способность ВЛ напряжением 10 кВ с установкой КБ поперечной компенсации

Длина линии, км	Предельная мощность ВЛ 10 кВ по режиму напряжения, МВт	Предельная мощность ВЛ 10 кВ с по термической устойчивости, МВт
3,00	2,536	2,350
3,24*	2,350	
5,00	1,522	
...	...	
15,0	0,507	

*граничная длина ВЛ

В режиме перекомпенсации реактивных нагрузок предельную мощность по нагреванию можно передать по линии с протяженностью, превышающей граничную. Увеличение мощности КБ в конце ВЛ (соответственно с ростом протяжённости линии) позволяет увеличить передаваемую мощность до величины предельной по нагреванию. С учётом ограничения по режиму напряжения в соответствии с выражением:

$$\Delta U_{\kappa} = \frac{P_{\text{м.у.}} \cdot R_W + ((P_{\text{м.у.}} \cdot \operatorname{tg} \varphi) - Q_{\text{КБ}}) \cdot X_W}{U_{\text{ном}}} \leq \Delta U_{\text{доп}}$$

получим искомую мощность компенсации в конце линии (табл. 5.2)

$$Q_{\text{КБ}} = \frac{P_{\text{м.у.}} \cdot R_W + P_{\text{м.у.}} \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot X_W - U_{\text{ном}} \cdot \Delta U_{\text{доп}}}{X_W}.$$

Таблица 5.2

Пропускная способность ВЛ 10 кВ при перекомпенсации реактивных нагрузок

Длина линии, км	Мощность КБ, Мвар	Предельная мощность ВЛ 10 кВ по режиму напряжения, МВт	Предельная мощность ВЛ 10 кВ по термической устойчивости, МВт
5,00	2,20	2,350	2,350
...	...		
15,0	5,85		

По данным результатам отметим: пропускная способность ВЛ с установкой КБ поперечной компенсации протяжённостью менее 3,2 км ограничивается допустимым нагреванием, при большей длине – режимом напряжения. При избыточной компенсации реактивных нагрузок появляется возможность повышения пропускной способности ВЛ длиной более 3,2 км до значения предельной мощности по критерию термической устойчивости. Таким образом, рассмотренные мероприятия позволяют увеличить пропускную способность ВЛ длиной менее 3,2 км в 1,20 раз, более 3,2 км – вплоть до 6,01 раз (для ВЛ протяженностью 15,0 км).

6. Режим передачи натуральной мощности является наиболее благоприятным для передачи электроэнергии переменным током, поскольку в силу сбалансированности электромагнитного поля линия не потребляет и не генерирует реактивную мощность, а потери активной мощности минимальны [4]. Для увеличения натуральной мощности распределительной линии 10 кВ до предельной мощности, допустимой по нагреванию плотностью тока,

$$P_{m.y.} = \frac{U_{ном}^2}{Z_B} \quad (3)$$

необходимо соответствующим образом уменьшить волновое сопротивление Z_B (выполнить его настройку на передачу данной мощности) посредством ёмкостной компенсации [5]. Соответственно ёмкостная проводимость на единицу длины, определяемая с учётом (3) из выражения

$$\dot{Z}_{B(K)} = \sqrt{\frac{(r_0 + jx_0)}{(jb_0 + jb_{K(0)})}},$$

составляет $jb_{K(0)} = 545,66 \cdot 10^{-6}$ См/км. Расчётные значения суммарной ёмкостной проводимости и соответствующей мощности КБ, равномерно распределённых по длине линии, приведены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты расчёта натуральной мощности ВЛ 10 кВ

Длина линии, км	Суммарная ёмкостная проводимость ВЛ, См	Мощность КБ, Мвар	Предельная мощность линии по термической устойчивости, МВт
3,00	$1636,98 \cdot 10^{-6}$	0,164	2,350
5,00	$2728,30 \cdot 10^{-6}$	0,273	
...	...	...	
15,0	$8184,90 \cdot 10^{-6}$	0,818	

Как видно из полученных результатов, пропускная способность для линий в режиме передачи натуральной мощности определяется (ограничена) допустимым нагреванием. Равномерное распределение КУ по длине значительно увеличивает предельную мощность, передаваемую по рассматриваемой ВЛ (вплоть до 6,01 раз для ВЛ протяжённостью 15,0 км). Ценность данного технического мероприятия заключается в возможности увеличения передаваемой мощности распределительной линии 10 кВ до предельной мощности, определяемой критерием термической устойчивости.

Итоговые результаты исследований (поз. 1-6) представлены в таблице 7.

Таблица 7

Итоговая оценка результативности мероприятий, направленных на повышение пропускной способности ВЛ 10 кВ.

№ п/п	Исполнение ВЛ	Длина ВЛ, км			
		3	5	...	15
		$P_{нб}$, МВт			
1	ВЛ 10 кВ традиционного исполнения проводом А 35	1,953	1,172	...	0,391
2	ВЛИ 10 кВ	1,872	1,123	...	0,374
3	ВЛ 10 кВ традиционного исполнения проводом А 50	2,568	1,541	...	0,514
4	ВЛИ 20 кВ	3,660	2,196	...	0,732
5.1	ВЛ 10 кВ, полная компенсация реактивных нагрузок	2,350	1,522	...	0,507
5.2	ВЛ 10 кВ, режим избыточной компенсации реактивных нагрузок	2,350	2,350	...	2,350
6	ВЛ 10 кВ, режим натуральной мощности	2,350	2,350	...	2,350

Выводы

1. Выполнен анализ влияния ряда технических (затратных) мероприятий, направленных на увеличение пропускной способности ВЛ напряжением 10 кВ традиционного исполнения. Возможности линии электропередачи могут быть увеличены от 1,2 до 6, 0 раз.

2. Наибольшее увеличение пропускной способности достигается при компенсации реактивных нагрузок и в режиме натуральной мощности. Возможности линии напряжением 10 кВ могут быть увеличены до значения мощности, предельного по нагреванию.

3. Переход к ВЛИ 20 кВ позволяет увеличить передаваемую мощность до значений, приближающихся к возможным для ВЛ напряжением 35 кВ традиционного исполнения.

4. Определение оптимального (наиболее эффективного) технического мероприятия увеличения пропускной способности линии электропередачи требует решения оптимизационной задачи анализа критериальных экономических показателей [1,2].

1. Герасименко А.А., Федин В. Т. Электроэнергетические системы и сети. Расчёты, анализ, оптимизация режимов работы и проектных решений электрических сетей. Ростов н/Д. Феникс, 2018. – 471 с.

2. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии. Изд-е 2-е. Ростов н/Д. Феникс, 2008. – 735 с.
 3. ГОСТ Р 52373-2012. Провода самонесущие, изолированные и защищённые для воздушных линий электропередачи.
 4. Кувшинов А. А. Методы увеличения натуральной мощности распределительной линии с потерями // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: труды V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием – Тольятти: ТГУ, 2017– С. 112 – 116.
 5. Кувшинов А. А. Волновое сопротивление и натуральная мощность компенсированной распределительной линии // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: труды V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием – Тольятти: ТГУ, 2017– С. 102 – 106.
-