

Особенности передачи мощности по протяженным КЛ 6-500 кВ переменного напряжения

УДК 621.315.21

В России уже накоплен опыт проектирования, строительства и эксплуатации кабельных линий (КЛ) с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). Разобравшись с типовыми схемами электроснабжения, ряд инженеров стал рассматривать возможность использования таких кабелей и для решения более амбициозных задач, среди которых, например, строительство КЛ переменного тока большой протяженности.

Дмитриев М.В.,

к.т.н., доцент Санкт-Петербургского политехнического университета

ВВЕДЕНИЕ

Лидерами по объемам строительства силовых КЛ классов 6–500 кВ являются крупные города и промышленные предприятия, также тут можно упомянуть и сети собственных нужд электрических станций. Во всех названных случаях расстояние от центра питания до нагрузки, как правило, не превосходит 3–5 км. Однако имеется ряд объектов, где длина КЛ значительна и достигает 10–15 км, что сопоставимо с поперечными размерами крупного современного мегаполиса, то есть речь идет о линиях 110–500 кВ так называемого глубокого ввода мощности в города или же о кольцевых линиях вокруг них. Известны протяженные линии и на классы напряжения 6–35 кВ, но они не имеют отношения к вводу мощности в города, а появляются «поневоле» из-за отсутствия рядом с нагрузкой удачно расположенного центра питания или же с его наличием, но без возможности расширения и подключения новых фидеров.

КЛ переменного напряжения 6–500 кВ длиной свыше 10–15 км считаются уже сложными с технической точки зрения, не говоря уже об их огромной стоимости. Тем не менее, за последнее время несколько раз приходилось слышать о куда более масштабных проектах — планах строительства ряда линий переменного

напряжения длиной до 50 км. Например, нефтяные компании рассматривают варианты питания своих прибрежных платформ с материка по кабелям до 110 кВ. К длинным кабелям присматриваются и на железных дорогах, где такие линии было бы полезно иметь для электроснабжения потребителей между соседними тяговыми подстанциями, отстоящими друг от друга порой на 40 км и более. Важной областью применения протяженных КЛ могла бы также стать и прокладка по территории различных заповедников или национальных парков, где строительство воздушных линий (даже с изолированными проводами типа СИП) по понятным причинам не может приветствоваться.

Для длинных кабельных линий придется решать многие технические вопросы. Во-первых, это показатели надежности, так как, к сожалению, аварийность КЛ (особенно концевых и соединительных муфт) пока еще выше, чем хотелось бы. Во-вторых, это испытания и поиск повреждений, ведь имеющиеся в сетях установки рассчитаны на зарядный ток и затухание, характерные для линий малой длины. В-третьих, это обоснование необходимости повторного заземления экранов по трассе линии для снижения напряжения на оболочке, а также борьба с потерями в экранах за

Ключевые слова:

кабельная линия, кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена, передача мощности, активная мощность, реактивная мощность, длинные линии электропередачи

Keywords:

cable line, cable with XLPE insulation, transmission of power, active power, reactive power, long transmission lines

счет рационального выбора схемы их соединения. В-четвертых, это защита КЛ (изоляция и облоочки) от грозовых и коммутационных перенапряжений.

Не будем пока рассматривать перечисленные проблемы, а оценим здесь саму возможность организации передачи мощности по протяженным КЛ на переменном напряжении. Для этого изучим основные установившиеся и квазиустановившиеся режимы работы протяженных кабельных линий. К таким режимам следует отнести:

- режим одностороннего питания КЛ без нагрузки (режим «холостого хода»),
- различные нагрузочные режимы (нормальный и послеаварийный).

«ДАЛЬНИЕ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ»

Теория передачи электрической мощности на дальние расстояния достаточно хорошо изучена и описана в ряде известных фундаментальных работ. К сожалению, практически все из таких трудов подразумевают передачу мощности по воздушным линиям (ВЛ), а анализ особенностей КЛ встретить затруднительно. Проясним, в чем может быть различие кабельных линий и воздушных, но прежде определимся с терминологией.

Точного значения длины, начиная с которой линия называется «дальней электропередачей», наверное не существует. Дальними ВЛ обычно полагаются такие, где длина превосходит 300–400 км. Названные цифры считаются пороговыми по той причине, что у более протяженных ВЛ для расчета установившихся режимов работы на промышленной частоте 50 Гц уже не вполне корректно использовать простые модели с сосредоточенными параметрами, среди которых так называемые П-схемы замещения (или Г-схемы замещения). Для ВЛ длиной более 300–400 км в расчетах на частоте 50 Гц необходимо брать или цепочку сразу из нескольких П-схем, или же «точную» модель с распределенными параметрами.

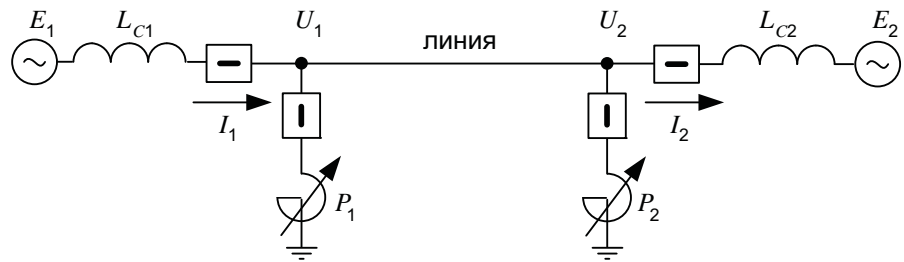


Рис. 1. Общая схема протяженной электропередачи

Критическая длина 300–400 км связана с таким понятием, как волновая длина линии λ , которая пропорциональна скорости распространения электромагнитной волны v . Поскольку для ВЛ скорость составляет $v \approx 300 \cdot 10^8$ м/с, для КЛ с СПЭ изоляцией — в полтора раза меньше $v \approx 200 \cdot 10^8$ м/с, то и «критическая длина» для КЛ будет в полтора раза меньше, чем для ВЛ, и может быть оценена в 200–250 км. Итак, КЛ длиной сверх 200–250 км могут считаться «дальними электропередачами».

В данный момент в России известны кабельные передачи длиной в основном всего до 10–15 км, но специалистов интересует вопрос о предельном расстоянии, на которое можно передать мощность по кабельной линии на переменном напряжении. Этот же вопрос можно сформулировать иначе: начиная с какой длины необходим переход к линиям постоянного напряжения, не имеющим характерных для 50 Гц проблем с режимом напряжения и балансом реактивной мощности.

Выскажем ряд соображений о таком предельном расстоянии, но основное внимание, тем не менее, уделим лишь диапазону длин до 50–100 км, так как именно он может оказаться востребован в ближайшие годы. Кабельные линии переменного напряжения длиной до 100 км формально не являются «дальними» (ведь они короче 200–250 км), и здесь они будут называться длинными или протяженными КЛ.

РЕАКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ ЛИНИИ И ЕЕ НАТУРАЛЬНЫЙ ТОК

На рисунке 1 дана общая схема протяженной электропередачи, включающая две электроэнергетические системы E_1 , E_2 , и линию с шунтирующими реакторами (P) на концах. Схема замещения элементарного участка « mn » линии приведена на рисунке 2 и имеет продольные активное сопротивление R_{mn} и индуктивность L_{mn} , поперечные активную проводимость G_{mn} и емкость C_{mn} . Пренебрегая на данном этапе R_{mn} и G_{mn} , запишем баланс реактивной мощности участка « mn », используя величины фазных токов I_m , I_n и фазных напряжений U_m и U_n .

Мощность, вырабатываемая емкостью линии, и мощность, потребляемая в ее индуктивности, могут быть оценены соответственно как

$$Q_C = U_n^2 \cdot \omega C_{mn} \text{ и } Q_L = I_m^2 \cdot \omega L_{mn},$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота, $f = 50$ Гц.

Эквивалентная реактивная мощность, вырабатываемая участком линии, равна

$$\Delta Q = Q_C - Q_L.$$

Чтобы линия была сбалансирована по реактивной мощности, не являясь ни ее источником, ни ее потребителем, должно выполняться условие $\Delta Q = 0$, откуда

$$U_n I_m = \sqrt{L_{mn} / C_{mn}} = Z_B,$$

где Z_B — волновое сопротивление линии, которое связано с индуктивностью L_{mn} и емкостью C_{mn} участка « mn ».

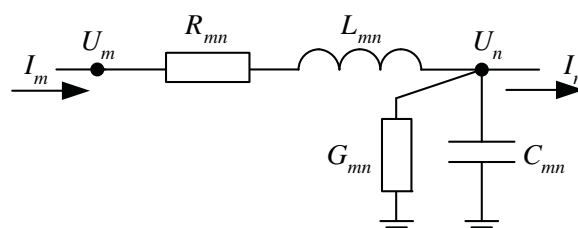


Рис. 2. Схема замещения участка « mn » линии электропередачи

Фазный ток I_m , отвечающий условию $\Delta Q = 0$, называется «натуральным током»

$$I_{\text{НАТ}} = U_n / Z_B = (U_{\text{НОМ}} / \sqrt{3}) / Z_B,$$

где $U_{\text{НОМ}}$ — номинальное напряжение сети.

Режимы работы линии можно классифицировать в зависимости от отношения ее фактического фазного тока I и ее натурального тока $I_{\text{НАТ}}$:

- при $0 \leq I / I_{\text{НАТ}} < 1$ линия является источником реактивной мощности $\Delta Q > 0$;
- при $I / I_{\text{НАТ}} = 1$ линия сбалансирована по реактивной мощности $\Delta Q = 0$;
- при $I / I_{\text{НАТ}} > 1$ линия является потребителем реактивной мощности $\Delta Q < 0$.

При введении понятия натурального тока $I_{\text{НАТ}}$ не были учтены активные сопротивление R и проводимость G (рисунок 2). Наличие R и G мешает дать простые аналитические выражения, описывающие процессы в линиях, режимы напряжения и балансы реактивной мощности.

Учет R и G приводит к тому, что на линии возникают дополнительные потери напряжения и, во-первых, снижается генерируемая емкостью реактивная мощность Q_C , а во-вторых, определенная ее часть безвозвратно теряется в виде потерь в R , G . Все это изменяет баланс реактивной мощности линии, и при токе $I = I_{\text{НАТ}}$ скорее всего уже не получится добиться идеального $\Delta Q = 0$.

ВОЛНОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КЛ

Как следует из выражения для натурального тока линии $I_{\text{НАТ}}$, важную роль играет волновое сопротивление Z_B («прямой последовательности»).

Волновое сопротивление ВЛ зависит от ряда факторов, среди них: расстояние между фазными проводниками и до земли, число и сечение проводников в фазе, число и расположение молниезащитных тросов. Для типовых ВЛ волновое сопротивление варьируется в диапазоне от 250 до 500 Ом.

Волновое сопротивление КЛ с изоляцией из СПЭ зависит от меньшего числа факторов — это

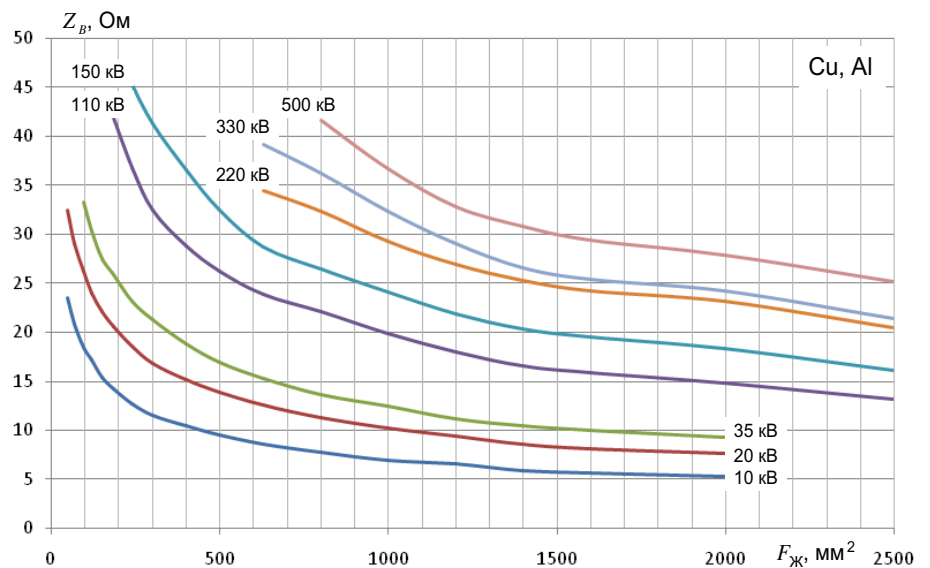


Рис. 3. Волновое сопротивление современного кабеля 6–500 кВ.

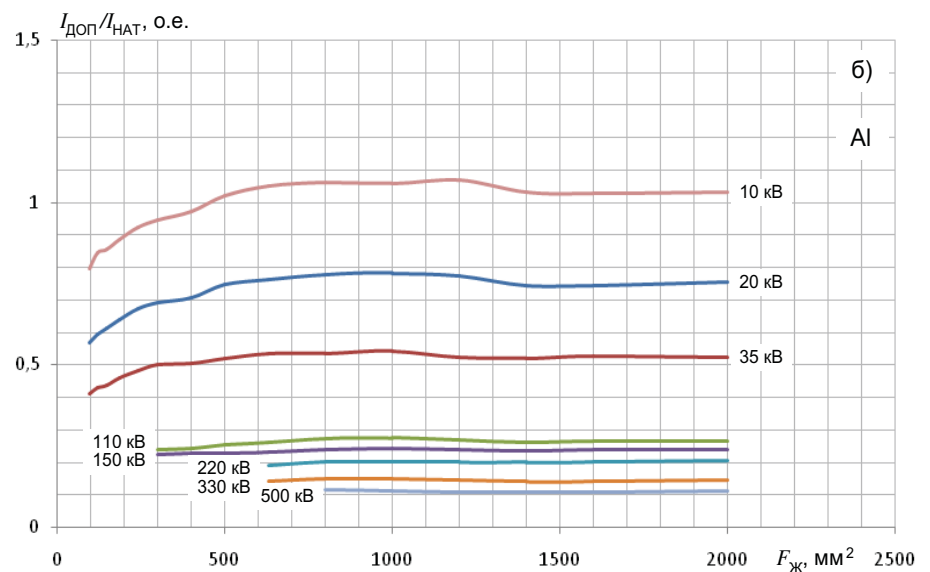
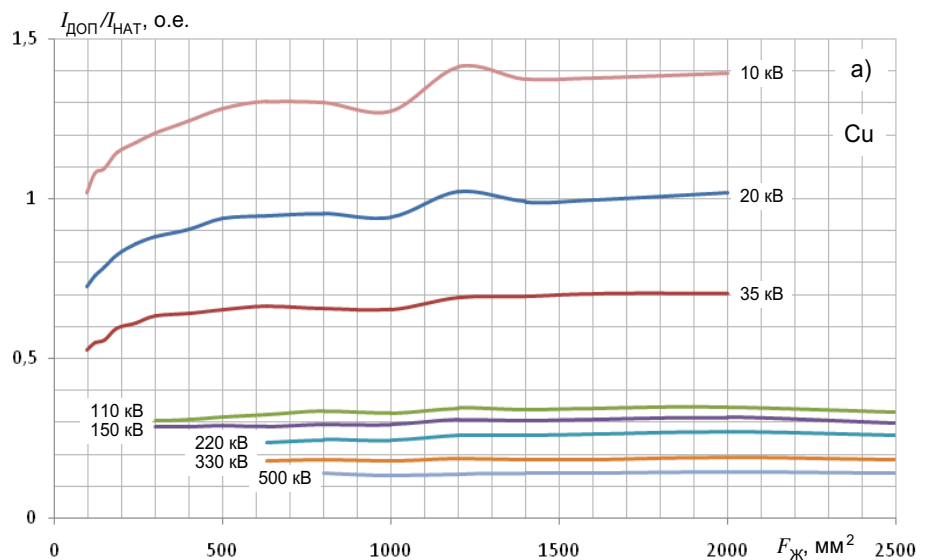


Рис. 4. Отношение допустимого тока жилы однофазного кабеля 6–500 кВ к его натуральному току при базовых условиях прокладки: а) медная жила, б) алюминиевая жила

толщина изоляции «жила-экран» (класс напряжения КЛ) и сечение токоведущей жилы. Значения сопротивления Z_B для КЛ приведены на рисунке 3, откуда видно, что Z_B может изменяться в широком диапазоне значений от 5 до 40 Ом. Если говорить о распространенных сечениях жилы, то:

- на классы 6–35 кВ имеем $Z_B \approx 10 \div 15$ Ом
- на класс 110 кВ имеем $Z_B \approx 15 \div 20$ Ом;
- на классы 220–500 кВ имеем $Z_B \approx 20 \div 30$ Ом.

НАТУРАЛЬНЫЙ ТОК КЛ

В нормальном режиме работы ток жилы I кабельной линии не превосходит ее длительно допустимого тока $I_{\text{доп}}$, отвечающего нагреву жилы и примыкающей к ней изоляции до предельно допустимой для СПЭ температуры 90°C . Следовательно, для КЛ соотношение фазного тока I в жиле и натурального тока $I_{\text{нат}}$ достигает максимального значения при $I = I_{\text{доп}}$.

Отношение $I/I_{\text{нат}}$ (и, в частности, его предельное значение $I_{\text{доп}}/I_{\text{нат}}$) является важной характеристикой нагрузочных режимов кабельных линий. Его вычисление всегда можно провести с помощью каталогов, где есть сведения по токам $I_{\text{доп}}$.

При построении графиков, приведенных на рисунке 4 (а, б), допустимый ток принят по данным каталога АВВ для базовых условий прокладки: фазы уложены в грунте сомкнутым треугольником, глубина 1 м, температура грунта 20°C , удельное тепловое сопротивление 1 мК/Вт, экраны лишены потерь (одностороннее заземление экранов или их транспозиция). Заметный «скачок» $I_{\text{доп}}/I_{\text{нат}}$ при сечении 1200 мм^2 обусловлен сменой конструкции жилы с обычной проволочной на сегментированную.

Из рисунка 4 видно, что для КЛ почти всегда $I_{\text{доп}}/I_{\text{нат}} < 1$, а значит режимы работы кабельных линий — это режимы $I/I_{\text{нат}} < 1$, когда линии являются источниками реактивной мощности.

Интересно, что соотношение $I_{\text{доп}}/I_{\text{нат}}$ заметно отличается для КЛ классов 6–35 кВ и КЛ классов 110–500 кВ.

КЛ 110–500 кВ имеют малое $I_{\text{доп}}/I_{\text{нат}} = 0,1 \div 0,3$, а значит в режимах с токами $I \leq I_{\text{доп}}$ реактивная мощность Q_C , генерируемая емкостью КЛ, в разы превосходит ее потребление Q_L в индуктивности КЛ, т.е. нагрузочные режимы КЛ с точки зрения баланса реактивной мощности почти не отличаются от «холостого хода».

Малое волновое сопротивление кабелей $Z_B = \sqrt{L/C}$ означает, что в сравнении с ВЛ они обладают значительной емкостью C . Поэтому величина $\Delta Q = Q_C - Q_L \approx Q_C$ в десятки раз превосходит реактивную мощность для ВЛ аналогичной длины и класса $U_{\text{ном}}$.

Чрезмерная генерируемая КЛ реактивная мощность — важнейший фактор, из-за которого возникают сложности со строительством и эксплуатацией протяженных кабельных линий переменного напряжения.

Эксплуатация протяженных КЛ 110–500 кВ без установки по концам мощных потребителей вырабатываемой линией реактивной мощности едва ли возможна. Такими потребителями могли бы выступать шунтирующие реакторы, показанные на рисунке 1. Выбор мощности реакторов, их числа и типа (управляемый или нет) следует проводить отдельно для каждого конкретного случая.

КЛ 20, 35 кВ обладают $I_{\text{доп}}/I_{\text{нат}} = 0,5 \div 1,0$. Это выше, чем для КЛ 110–500 кВ, и линии 20 и 35 кВ

в режимах максимальной нагрузки $I \approx I_{\text{доп}}$ вполне можно было бы считать достаточно сбалансированными по реактивной мощности, $\Delta Q \approx 0$. Отсюда следует, что эксплуатацию протяженных КЛ 20 и 35 кВ, по всей видимости, удастся наладить и без реакторов.

КЛ 10 кВ имеют $I_{\text{доп}}/I_{\text{нат}} = 1,0 \div 1,5$, и это единственный класс, где кабели в режиме максимальной загрузки обладают $\Delta Q < 0$, то есть являются дефицитными по реактивной мощности и забирают ее из сети. Эксплуатация протяженных КЛ 10 кВ может оказаться проблемной по причине недостатка реактивной мощности и, следовательно, низкого уровня напряжения на конце линии у потребителя.

РЕЖИМ НЕНАГРУЖЕННОЙ КЛ (РЕЖИМ «ХОЛОСТОГО ХОДА»)

Напряжение в конце КЛ

Повышение напряжения промышленной частоты 50 Гц на разомкнутом конце односторонне питаемой линии связано с тем, что данная «холостая» линия является источником реактивной мощности $\Delta Q \approx Q_C > 0$ — она переносится от емкости линии C к питающей сети, то есть от конца линии к ее началу. В результате на индуктивности линии L (и на индуктивности сети) возникает падение напряжения такого знака, что напряжение в конце линии больше, чем в начале.

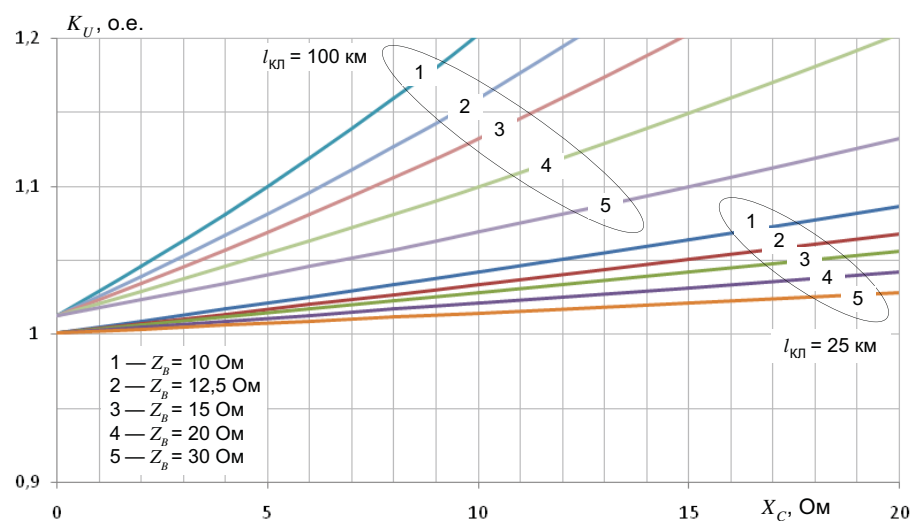


Рис. 5. Режим ненагруженной КЛ (режим «холостого хода»). Повышение напряжения в конце КЛ в зависимости от сопротивления питающей сети (0–20 Ом). Варьируется длина линии (25, 100 км) и ее волновое сопротивление (10–30 Ом)

На рисунке 5 даны результаты расчетов $K_U = U_2 / (U_{НОМ} / \sqrt{3})$ повышения напряжения в конце КЛ в зависимости от ее длины, волнового сопротивления Z_B , сопротивления сети X_C . Видно, что наибольшее K_U имеет место для КЛ:

- значительной протяженности $l_{КЛ}$;
- с низким волновым сопротивлением Z_B (характерно для кабелей 6–35 кВ, причем повышенного сечения жилы $F_{ж}$, рисунок 3);
- с большим X_C (характерно для сетей с малыми токами короткого замыкания).

Для сетей 6–35 кВ волновое сопротивление $Z_B \geq 10$ Ом, а токи трехфазного короткого замыкания $I_{К(3)}$, как правило, таковы, что

$$X_C = (U_{НОМ} / \sqrt{3}) / I_{К(3)} < 5 \text{ Ом.}$$

Для сетей 110–500 кВ обычно $Z_B \geq 20$ Ом и $X_C < 10$ Ом. Следовательно, согласно рисунку 5, для любых даже весьма протяженных КЛ (длиной до 100 км) классов от 6 до 500 кВ повышение напряжения в конце не превосходит $K_U = 1,05 \div 1,1$, то есть не представляет никакой опасности для оборудования.

Ток в начале КЛ

Определим значение тока промышленной частоты 50 Гц, который переносит в питающую сеть мощность, генерируемую линией. Такой ток меняет свою величину вдоль трассы линии от нулевого значения в ее конце до максимального в ее начале. Следовательно, самый большой нагрев жилы КЛ током «холостого хода» будет в начале линии, то есть вблизи от питающей сети.

На рисунке 6 приведены оценки тока холостого хода для КЛ с разными волновыми сопротивлениями Z_B в расчете на 1 кВ номинального напряжения. Например, для КЛ длиной $l_{КЛ} = 100$ км и $Z_B = 10$ Ом ток «холостого хода» будет 9,1 А на каждый 1 кВ номинального напряжения. Если КЛ $U_{НОМ} = 10$ кВ, то тогда $I_{ХХ} = 9,1 \cdot 10 = 91$ А.

КЛ 110–500 кВ, как следует из рисунка 6, при длине $l_{КЛ} = 100$ км имеют токи $I_{ХХ}$ величиной в сотни ампер, которые оказываются близки к допустимым нагрузкам на жилы типового сечения, также обычно составляющим сотни

ампер. Следовательно, создание КЛ 110–500 кВ переменного напряжения длиной сверх 100 км невозможно по причине перегрева изоляции по концам линии токами «холостого хода».

КЛ 10, 20, 35 кВ имеют уже не столь большие токи $I_{ХХ}$, хотя и сечение жилы для линий таких классов напряжения, как правило, небольшое. Поэтому создание КЛ 10, 20, 35 кВ переменного напряжения длиной сверх 100 км, скорее всего, возможно, но только если сечение жилы будет выбрано «с запасом» и обеспечит при «холостом ходе» допустимый уровень температуры изоляции.

Реактивная мощность в начале КЛ

В режиме одностороннего питания КЛ без нагрузки (в режиме «холостого хода») емкость линии вырабатывает реактивную мощность, а ее потребление в индуктивности линии незначительно. Поэтому итоговое значение генерируемой КЛ реактивной мощности можно оценить $\Delta Q = Q_C - Q_L \approx Q_C$.

Трехфазная реактивная мощность КЛ в начале линии, сбрасываемая в сеть

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot I_{ХХ},$$

где $I_{ХХ}$ легко определить с помощью рисунка 6.

Например, для кабельной линии $U_{НОМ} = 10$ кВ длиной $l_{КЛ} = 100$ км и $Z_B = 10$ Ом

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 91 = 1580 \text{ квар}$$

или 1,58 Мвар.

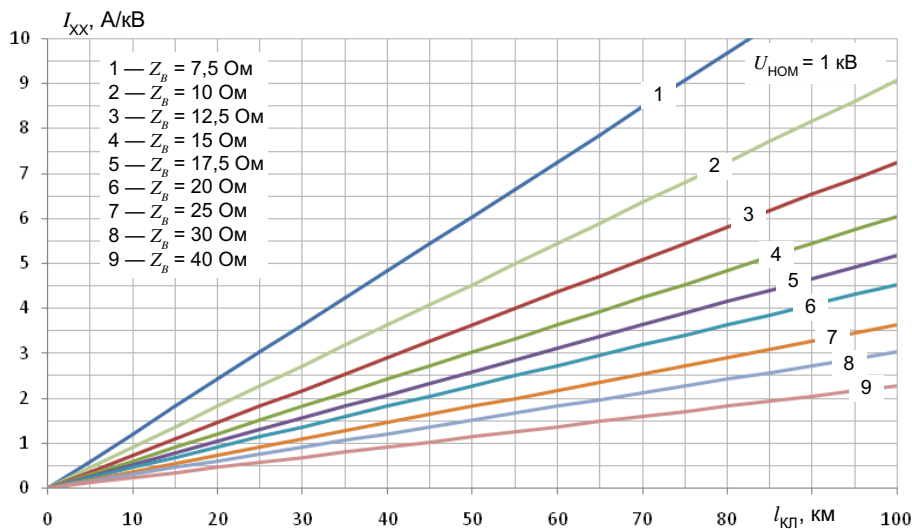


Рис. 6. Режим «холостого хода». Удельное значение тока «холостого хода» КЛ в зависимости от ее длины (0–100 км). Варьируется волновое сопротивление линии (7,5–40 Ом).

НАГРУЗОЧНЫЕ РЕЖИМЫ

Рассчитав в режиме «холостого хода» напряжение, ток и мощность, перейдем теперь к рассмотрению различных нагрузочных режимов протяженных КЛ.

Как правило, все кабельные линии имеют двухцепное исполнение. В обычном нормальном режиме работы (НР, рисунок 7а) обе цепи находятся в работе, и каждая из них пропускает половину общего тока нагрузки. В послеаварийном режиме (ПАР, рисунок 7б), когда одна из цепей по каким-то причинам отключена, весь ток нагрузки приходится на единственную остающуюся в работе цепь.

Важно, чтобы длительно допустимый ток $I_{доп}$ любой из двух цепей отвечал суммарной нагрузке всех потребителей на кон-

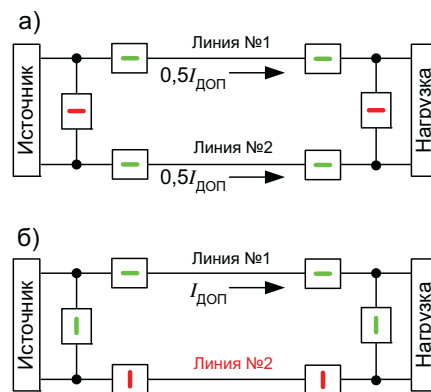


Рис. 7. Нагрузочный режим двухцепной линии электропередачи: а) в работе находятся две цепи; б) в работе находится одна цепь

це — в послеаварийном режиме это позволит исправной цепи длительно работать без перегрева изоляции жилы. В нормальном режиме загрузка жилы тогда составит всего $0,5I_{\text{доп}}$, то есть будет заведомо приемлемой.

При рассмотрении вопросов передачи мощности на большие расстояния по линиям 110–500 кВ, как правило, полагается, что связываются две равноправные электроэнергетические системы (рисунок 1). Однако на 6–35 кВ, скорее всего, речь идет о линии, осуществляющей питание удаленной нагрузки, и поэтому схема для проведения расчетов будет иметь лишь один сетевой источник (как на рисунке 7).

При проведении расчетов режимов протяженных КЛ важно контролировать следующие величины:

- напряжение U_2 в конце КЛ (коэффициент K_U), чтобы не допустить отклонения за допустимые пределы;
- ток в жиле (он различен в начале I_1 и в конце I_2 линии), чтобы не допустить перегрева изоляции жилы на каком-то из участков трассы;
- реактивная мощность в начале линии Q_1 (она или сбрасывается из КЛ в сеть, или наоборот потребляется из сети), чтобы оценить необходимость в реакторах;
- потери активной мощности на трассе (разность между активной мощностью в начале P_1 и в конце P_2 линии), чтобы оценить экономическую целесообразность работы линии в том или ином режиме.

Рассмотрим примеры расчета для КЛ 110 кВ и КЛ 20 кВ. Они позволят лучше разобраться в режимах работы КЛ.

ПРИМЕР РАСЧЕТА ДЛЯ КЛ 110 КВ

Есть кабельная линия 110 кВ с медной жилой сечением 1000 мм² длиной 50 км. Положим, что все потери в КЛ происходят в ее жиле, а потерь в экранов нет, тогда допустимый ток для жилы согласно каталогу АВВ при базовых условиях прокладки равен $I_{\text{доп}} = 1050$ А, то есть в нормальном режиме двух-

Табл. 1. Режимы работы КЛ 110 кВ 1000 мм² (Cu) длиной 50 км ($\cos\varphi = 1$)

I_1	I_2	P_1	P_2	$\Delta P = P_1 - P_2$	Q_1	Q_2	$Q_2 - Q_1$	U_1	U_2		
А		МВт		МВт	%	Мвар		K_U			
252	0	0,0	0,0	0,05	—	-48,3	0	48,3	1,008	1,011	1,1
322	202	38,9	38,7	0,17	0,4	-48,0	0	48,0	1,008	1,008	0,8
472	402	77,4	76,9	0,53	0,7	-47,2	0	47,2	1,008	1,004	0,4
649	601	115,6	114,5	1,13	1,0	-46,1	0	46,1	1,007	1,001	0,1
833	798	153,6	151,6	1,96	1,3	-44,6	0	44,6	1,007	0,997	-0,3
1021	994	191,1	188,1	3,01	1,6	-42,8	0	42,8	1,007	0,994	-0,6
1210	1188	228,3	224,0	4,28	1,9	-40,6	0	40,6	1,006	0,990	-1,0

Табл. 2. Режимы работы КЛ 110 кВ 1000 мм² (Cu) длиной 50 км ($\cos\varphi = 0,85$)

I_1	I_2	P_1	P_2	$\Delta P = P_1 - P_2$	Q_1	Q_2	$Q_2 - Q_1$	U_1	U_2		
А		МВт		МВт	%	Мвар		K_U			
252	0	0,0	0,0	0,05	---	-48,3	0	48,3	1,008	1,011	1,1
223	200	32,6	32,5	0,09	0,3	-27,5	20,2	47,7	1,005	1,002	0,2
339	397	64,3	64,0	0,36	0,6	-7,0	39,6	46,7	1,001	0,994	-0,6
505	591	95,2	94,3	0,86	0,9	13,1	58,4	45,3	0,998	0,985	-1,5
683	781	125,1	123,6	1,58	1,3	32,9	76,6	43,7	0,994	0,977	-2,3
863	968	154,3	151,8	2,49	1,6	52,4	94,1	41,7	0,991	0,968	-3,2
1043	1152	182,7	179,1	3,59	2,0	71,6	111,0	39,4	0,988	0,960	-4,0

цепной линии в жилах каждой из цепей ток составит около 500 А, а в послеаварийном — в районе примерно 1000 А.

Волновое сопротивление КЛ согласно рисунку 3 составляет $Z_B = 20$ Ом. Индуктивное сопротивление питающей сети $X_C = 2$ Ом, что отвечает току трехфазного короткого замыкания на шинах $I_{K(3)} = (110 / \sqrt{3}) / 2 \approx 32$ кА.

Результаты расчетов режима по мере увеличения тока нагрузки, включенной в конце КЛ, даны в таблицах 1 и 2 (коэффициент мощности нагрузки $\cos\varphi = 1$ или $\cos\varphi = 0,85$). Наиболее значимые цифры выделены жирным шрифтом. Индекс 1 — начало линии, 2 — ее конец

Токи. Для таблицы 1 нагрузка не потребляет реактивную мощность $Q_2 = 0$. Значит вся избыточная реактивная мощность линии $\Delta Q = Q_2 - Q_1$ сбрасывается в сеть, и становится ясно, почему ток в начале линии I_1 больше, чем в ее конце I_2 . Для таблицы 2 нагрузка $\cos\varphi = 0,85$ потребляет

реактивную мощность, и поэтому линия сбрасывает свою мощность уже не только в сеть, но и в нагрузку, и получается, что иной раз ток в конце I_2 больше тока в начале I_1 .

Ток «холостого хода» составляет 252 А и не представляет опасности для жилы (опасным был бы ток более $I_{\text{доп}} = 1050$ А).

Напряжения. В таблицах 1 и 2 напряжение в конце линии отклоняется от номинального не более чем $\pm 5\%$, что является допустимым и не требует действий по изменению коэффициента трансформации трансформаторов.

Активная мощность. В нормальном режиме работы при токе I_1 в жиле около 500 А потери активной мощности $\Delta P = P_1 - P_2$ в линии — в районе 1% от передаваемой мощности P_2 , а в послеаварийном режиме при токе в жиле примерно 1000 А — уже около 2%. Указанные цифры вполне допустимы.

Потери мощности в таблице 2 несколько меньше, чем в табли-

це 1. Это связано с тем, что для таблицы 2 генерируемая емкостью линии реактивная мощность проходит не только в сеть, но и в нагрузку, а значит проходит меньший путь по жиле кабеля.

Реактивная мощность. Поскольку условно положительное направление тока и мощности принято от сети в линию, то отрицательное значение мощности означает, что она проходит в обратном направлении (из КЛ в сеть), то есть линия является источником реактивной мощности $\Delta Q = Q_C - Q_L = Q_2 - Q_1 > 0$.

Реактивная мощность в режиме «холостого хода» составляет 48,3 Мвар и вряд ли может быть поглощена сетью 110 кВ. Требуется установка реакторов.

Натуральный ток КЛ 110 кВ при $Z_B = 20$ Ом будет $I_{\text{НАТ}} = (110 / \sqrt{3}) / 20 \approx 3175$ А, и поэтому в таблицах 1 и 2 при токах жилы в диапазоне от 0 до 1000 А линия оказывается в условиях $0 \leq I / I_{\text{НАТ}} < 1$ и, следовательно, все время находится в режиме генерации реактивной мощности $\Delta Q = Q_C - Q_L = Q_2 - Q_1 \approx Q_C$, причем значительной. В таблице 1 эта мощность целиком сбрасывается в сеть, тогда как в таблице 2 — в сеть и в нагрузку.

В таблице 2 реактивная мощность в начале КЛ существенно изменяется по мере роста нагрузки в конце линии, и поэтому реактор, рекомендуемый к установке в начале КЛ, должен быть не обычным, а управляемым, то есть способным к изменению потребляемой им мощности в широком диапазоне значений от 0 до 48,3 Мвар. При токах нагрузки выше 500 А (по таблице 2) линия из режима сброса в сеть реактивной мощности переходит к ее потреблению из сети, и здесь реактор следует переводить из режима потребления реактивной мощности в «отключенное» состояние.

Интересно, что на протяженных ВЛ установку реакторов предусматривают в первую очередь на «разомкнутом» конце ВЛ с целью не допустить повышения напряжения 50 Гц в режиме «холостого хода». Для КЛ проблемы повышения почти не существует, но есть вопросы значительной избыточной реак-

тивной мощности, и для их решения реактор можно устанавливать как в конце КЛ, так и в ее начале, то есть со стороны, куда сбрасывается реактивная мощность линии.

Заключение. Расчеты показали, что кабельная линия 110 кВ протяженностью 50 км генерирует значительную реактивную мощность и по этой причине вряд ли сможет эксплуатироваться без управляемого реактора, установленного в ее начале. В остальном указанная линия имеет приемлемые параметры режима: неопасный ток «холостого хода», отклонения напряжения не более допустимых 5% пределов, малые потери на фоне значительной передаваемой активной мощности.

ПРИМЕР РАСЧЕТА ДЛЯ КЛ 20 кВ

Аналогичные расчеты были проделаны для КЛ 20 кВ длиной 50 км с медной жилой 1000 мм². Они показали, что напряжение и ток «холостого хода» не опасны, а реактивная мощность может быть поглощена самой сетью и не требует установки реакторов. Основные нарекания оказались связаны с работой КЛ в послеаварийном режиме ПАР, когда ток жилы КЛ выходит на свое предельное значение, отвечающее максимально возможной температуре СПЭ изоляции. Дело в том, что в таком ПАР относительные потери активной мощности в жиле достигают значительных 10%, а напряжение в конце КЛ снижается на 20% от номинального.

Величины активных потерь мощности $\Delta P = P_1 - P_2$, выраженные в МВт, почти не отличаются для рассмотренных КЛ 20 кВ и КЛ 110 кВ, поскольку два указанных примера одинаковы с точки зрения сечения жилы и тока в ней. Однако передаваемая по КЛ мощность P_2 на напряжении 110 кВ в разы больше, чем на 20 кВ, и поэтому относительные потери $\Delta P / P_2$ для КЛ 20 кВ заметны, а для КЛ 110 кВ — почти нет.

Натуральный ток КЛ 20 кВ при $Z_B = 10$ Ом будет $I_{\text{НАТ}} = (20 / \sqrt{3}) / 10 \approx 1154$ А, и тогда при токах послеаварийного режима ПАР около 1000 А линия сбалансирована и об-

ладает $\Delta Q = Q_2 - Q_1 \approx 0$. Это отчасти объясняет тот факт, что напряжение в конце КЛ в ПАР снижается достаточно сильно (на 20%), ведь нагрузка КЛ вынуждена получать свою реактивную мощность не по «короткому» пути от емкости КЛ, а по «длинному» — от сети, и реактивная мощность из сети в нагрузку проходит вдоль всей трассы КЛ, создавая в жиле дополнительное падение напряжения.

Снижение напряжения в конце КЛ может быть частично исправлено за счет корректировки коэффициента трансформации трансформатора (РПН или ПБВ), а вот со значительными потерями активной мощности бороться удастся только так:

- за счет повышения сечения жилы сверх 1000 мм²;
- за счет эксплуатации КЛ при токах менее допустимого.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Кабельные линии классов 6–35 кВ и 110–500 кВ существенно отличаются друг от друга по величине натурального тока и по режиму реактивной мощности. Тем более они отличаются по этим параметрам от воздушных линий.
2. Эксплуатация протяженных КЛ переменного напряжения 110–500 кВ длиной до 50–100 км возможна, если они будут оснащаться установленными по концам управляемыми шунтирующими реакторами соответствующей мощности.
3. Эксплуатация протяженных КЛ переменного напряжения 6–35 кВ длиной до 50–100 км возможна и без реакторов, однако сечение жилы КЛ рекомендуется брать завышенным, что позволит улучшить параметры нагрузочных режимов: снизить потери активной мощности в линии и повысить уровни напряжения на конце.
4. Строительство и эксплуатация КЛ 6–35 кВ и 110–500 кВ переменного напряжения 50 Гц длиной сверх 100 км едва ли возможна. При необходимости создания КЛ длиной более 100 км крайне сложно обойтись без технологий постоянного тока. 