

ле в течение 4 лет в диспетчерской службе Московского РДУ.

Список литературы

1. Макоклюев Б. И., Антонов А. В., Набиев Р. Ф. Информационная структура и программные средства обработки и хранения данных технологического оборудования и режимных параметров. – Электрические станции, 2004, № 6.
2. Макоклюев Б. И., Полижаров А. С. Информационные системы для решения технологических задач на энергообъектах. – Энергетик, 2007, № 8.
3. Единая система классификации и кодирования в электроэнергетике. Проблемы и пути решения / Макоклюев Б. И., Лондер М. И., Попов С. Г. и др. – Электрические станции, 2006, № 3.
4. Кузнецов С. Д. Основы баз данных. М.: Интернет-университет информационных технологий, 2005.
5. Регистрация команд диспетчера РДУ и расчёт отклонений диспетчерских графиков с использованием компонент комплекса “Энергостат” / Макоклюев Б. И., Полижаров А. С., Владимиров А. И., Данильцев С. С. – Энергетик, 2007, № 10.

Влияние параметров и схем соединения экранов однофазных кабелей на уменьшение потерь в КЛ

Филиппов М. М., инж.

• ОАО “Энергокомплекс”

При применении однофазных кабелей большое влияние на уменьшение потерь в КЛ и надёжность их работы оказывает правильный выбор сечения экранов и схемы их соединения для трёхфазной системы. Варианты схем соединения экранов достаточно полно разработаны теоретически [1] и находят широкое применение на практике, анализу же экономичности при проектировании КЛ уделяется неоправданно меньше внимания.

В данной статье все рассуждения, формулы, рисунки и расчётные величины в целях упрощения изложения приводятся применительно к укладке фаз кабелей треугольником вплотную друг к другу. Однако выводы, получаемые для этого способа прокладки, принципиально справедливы и для других способов прокладки.

Кроме того, в статье умышленно опущены методы расчёта сечения экранов и рассматриваются только вопросы уменьшения потерь в КЛ в зависимости от параметров и схем сборки экранов.

Характеристикой эффективности КЛ является её КПД

$$\text{КПД} = (P - P_{\text{ж}} - P_{\text{э}} - P_{\text{д}}) / P, \quad (1)$$

где P – передаваемая мощность; $P_{\text{ж}}$ – потери в жиле; $P_{\text{э}}$ – потери в экране; $P_{\text{д}}$ – диэлектрические потери в изоляции.

Тип кабеля и его сечение определяются необходимостью передачи заданной мощности и тем самым диктуют $P_{\text{ж}}$ и $P_{\text{э}}$.

Другое дело, что за счёт оптимального выбора сечения экранов и схем их соединения можно добиться снижения $P_{\text{э}}$ и существенного улучшения эффективности КЛ.

В наиболее распространённых схемах соединения экранов с заземлением их по концам КЛ потери в экранах на одну фазу

$$P_{\text{э}} = I_{\text{э}}^2 R_{\text{э}}, \quad (2)$$

где $I_{\text{э}}$ – ток в экране, индуцируемый током в жиле $I_{\text{ж}}$; $R_{\text{э}}$ – активное сопротивление экрана.

Известно [2], что

$$I_{\text{э}} = I_{\text{ж}} X_m / \sqrt{X_m^2 + R_{\text{э}}^2}, \quad (3)$$

где X_m – индуктивное сопротивление экрана.

Поэтому можно выразить

$$P_{\text{э}} = I_{\text{ж}}^2 X_m^2 R_{\text{э}} / (X_m^2 + R_{\text{э}}^2). \quad (4)$$

Принимая потери в жиле за базовый показатель, удобнее для оценки $P_{\text{э}}$ пользоваться коэффициентом потерь

$$\lambda = P_{\text{э}} / P_{\text{ж}} = X_m^2 P_{\text{э}} / R_{\text{ж}} (X_m^2 + R_{\text{э}}^2). \quad (5)$$

График зависимости λ от сечения или соответственно от активного сопротивления кабеля изображён на рис. 1 на примере кабелей с медной жилой и экраном из медных проволок. Часть кривой, изображённая пунктиром, практического значения не имеет из-за нецелесообразности изготовления кабеля с такими параметрами. Из графика следует важный вывод – с увеличением сечения экрана (т.е. с уменьшением $R_{\text{э}}$) растут потери, снижается КПД электропередачи.

На рис. 2 показано изменение λ в зависимости от X_m , т.е. от взаимной удалённости фаз относительно друг друга. Явление роста потерь, связанное с увеличением расстояния между фазами, не-

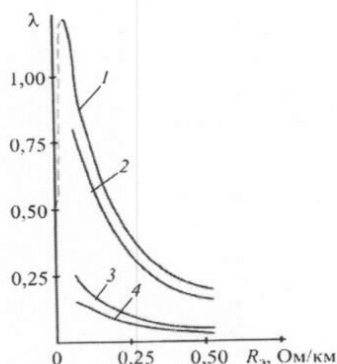


Рис. 1. График зависимости $\lambda = P_3/P_x$ от сопротивления экрана R_x при прокладке кабеля в треугольник и расстоянии между осями кабелей s , равном диаметру кабеля d :
 1 — $R_x = 0,018$ Ом/км, $S_x = 1000$ мм²; 2 — $R_x = 0,0221$ Ом/км, $S_x = 800$ мм²; 3 — $R_x = 0,0754$ Ом/км, $S_x = 240$ мм²; 4 — $R_x = 0,124$ Ом/км, $S_x = 150$ мм²

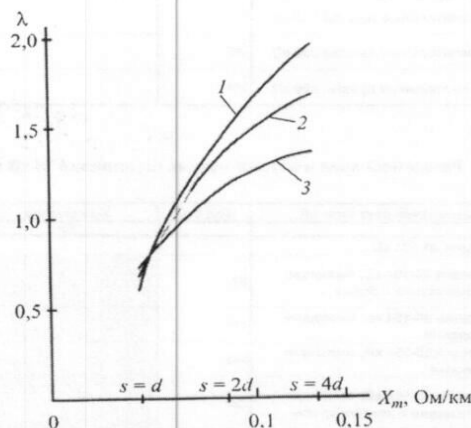


Рис. 2. График зависимости $\lambda = P_3/P_x$ от индуктивного сопротивления экрана X_m при прокладке кабелей в треугольник ($R_x = 0,03$ Ом/км):
 1 — $R_x = 0,08$ Ом/км; 2 — $R_x = 0,06$ Ом/км; 3 — $R_x = 0,04$ Ом/км

обходимо иметь в виду, особенно для КЛ со смешанной прокладкой в земле и коллекторе с различными X_m на этих участках. Значительная разница в потерях при разных способах укладки кабелей требует отдельных расчётов пропускной способности КЛ на таких участках.

При прокладке однофазных кабелей в треугольник на напряжении 110 кВ и выше в коллекторах с расстоянием между полками 250 мм (ПУЭ, табл. 2.31) расстояние между осями фаз $s = 2,4d$. Согласно рис. 2, при $s = 2,4d$ происходит резкое увеличение потерь по сравнению с потерями при $s = d$. Одновременно полезно принять к сведению, что с увеличением сечения экранов относительные потери мощности снижаются.

Из рис. 1 очевидно, что мероприятия по снижению потерь наиболее эффективны для КЛ с большим сечением экранов, т.е. для линий высокого напряжения, именно поэтому для КЛ высокого напряжения, по которым предполагается передача больших мощностей, разработаны и внедрены в практику схемы с доведением P_3 в пределе до 0. Несмотря на удорожание сооружения КЛ и усложнение эксплуатации, применение этих схем даёт значительную экономию потерь электроэнергии

при передаче и, что не менее важно, повышает пропускную способность КЛ.

Так, для КЛ 220 кВ с сечением жилы 1000 мм² и экрана 185 мм² при снижении тока в экране до нуля (например, используя транспозицию экранов) при среднегодовой нагрузке 500 А (50% пропускной способности кабеля) достигается снижение потерь на 120 тыс. кВт·ч/км в год. При этом требуемое сечение жилы кабеля уменьшается более чем на 10%.

Но это совсем не значит, что проблема снижения потерь в экранах не существенна для КЛ среднего напряжения 6–35 кВ. Принимая во внимание протяжённость сетей среднего напряжения, правильный выбор сечения экранов даёт возможность в общепромышленном масштабе получить существенный эффект.

Количественные оценки снижения допустимого рабочего тока по кабелю и рост потерь мощности с увеличением сечения экрана показаны в

Таблица 1

Параметр	Сечение экрана, мм ²		
	35	50	70
Расчётный допустимый ток КЛ, А	540	535	530
Относительные потери мощности, отн. ед.:			
в экране P_3/P_{35}	1,0	1,34	1,91
в КЛ $(P_3 + P_3)/(P_3 + P_{35})$	1,0	1,015	1,04

Таблица 2

Показатель	Сечение, мм ²	
	630/95	1000/95
Длительно допустимый ток в кабеле 100–300 кВ, А:		
при заземлении экранов по концам КЛ и прокладке кабелей:		
в плоскости	605	675
треугольником	825	1010
при транспозиции экранов и прокладке кабелей:		
в плоскости	935	1225
треугольником	880	1150

Примечание. Числитель — сечение кабеля; знаменатель — сечение экрана.

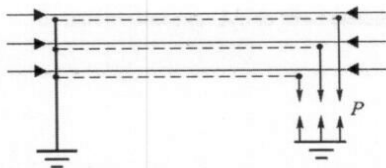


Рис. 3. Схема прокладки кабелей с заземлением экранов в одной точке:

P – разрядники

табл. 1 на примере кабеля 10 кВ сечением 240 мм² относительно сечения экрана 35 мм².

Таким образом, с целью снижения P , необходимо рассмотреть следующие варианты:

схему с заземлением экранов по концам КЛ с оптимизацией выбора сечения экрана, чтобы уменьшить индуцируемые токи в экранах;

схему с заземлением экранов в одной точке или с транспозицией экранов для снижения токов в экранах (в пределе до нуля);

способы укладки однофазных кабелей в трёхфазную систему (в плоскости или треугольнике) с вариациями расстояний между фазами.

Из анализа схемных решений по соединению экранов следует, что для минимизации потерь самой радикальной является схема с соединением экранов и заземлением их в одной точке (рис. 3). В этой схеме исключается протекание наведённого тока по экранам. Однако возможность её применения определяется расчётом и оценкой наведённого напряжения на разомкнутом конце экрана при протекании максимально возможного сквозного (внешнего) тока короткого замыкания (КЗ), а также на основании расчёта и оценки потенциала на контуре заземления в режиме однофазного КЗ в точке заземления экранов ($U_{\text{конт}} = I_{\text{кз}}^{(1)} R_{\text{зз}}$). При такой схеме экранов этот потенциал выносится на противоположный конец КЛ.

На практике в мощных энергосистемах с большими токами однофазного КЗ применение такой схемы весьма проблематично, особенно для протяжённых по длине КЛ, прокладываемых с выходом за пределы контура заземления.

Большое распространение для снижения потерь получила схема с транспозицией экранов (рис. 4). В идеальном случае, когда длины секций транспозиции равны по величине, ток в экранах отсутствует. При несбалансированной транспозиции в формулах (2) – (5) вместо I , используется ток небаланса в экранах

$$I_{\text{з.нб}} = I_{\text{ж}} X'_m (L_1 + aL_2 + a^2 L_3) / \sqrt{X_m^2 + R_3^2}, \quad (6)$$

где X'_m – индуктивное сопротивление экрана на единицу длины; L_1, L_2, L_3 – длины соответствующей секции транспозиции; a – фазовый множитель (оператор).

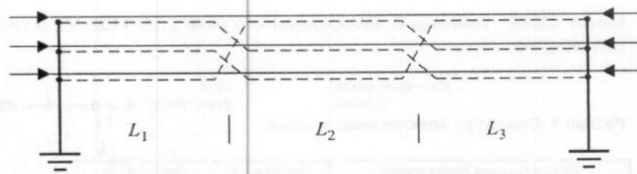


Рис. 4. Схема прокладки кабелей с использованием транспозиции экранов:

L_1, L_2, L_3 – соответственно длина первой, второй и третьей секции транспозиции

Для сильнонагруженных КЛ высокого напряжения отказ от такого соединения экранов должен быть мотивирован.

В попытке добиться большей эффективности КЛ представляется целесообразным рассмотреть возможность использования схемы с прокладкой дополнительного проводника, который укладывается на всём протяжении КЛ в середине треугольника однофазных кабелей (рис. 5). Такая схема обладает рядом достоинств и может найти применение, если исходить из того, что при однофазном КЗ на КЛ под воздействием дуги происходят прожог оболочки и перекрытие на дополнительный проводник.

При таком допущении экран повреждённой фазы разгружается от полного тока КЗ, так как ток КЗ распределяется между экраном и дополнительным проводником обратно пропорционально их сопротивлениям. В рассматриваемой схеме уменьшается сечение экранов, чем достигается экономия меди. Общее сечение экранов трёх фаз, включая дополнительный проводник, и выбираемое по термической стойкости при однофазном КЗ на КЛ меньше суммарного сечения экранов, рассчитанного по такому же току КЗ для каждого экрана в отдельности без дополнительного проводника. Одновременно обеспечивается снижение потерь мощности при передаче электроэнергии, так как в симметричном режиме, т.е. в режиме нагрузки, по дополнительному проводнику ток не протекает.

К указанному можно добавить, что расширяется возможность применения схемы заземления экранов в одной точке, так как происходит выравнивание потенциалов на экранах и контурах заземления по концам КЛ при однофазных КЗ. Этот способ широко и с успехом применялся в 1980 – 1990-х годах в Мосэнерго. И хотя он применялся из-за того, что промышленный выпуск отечественных кабелей с полиэтиленовой изоляцией был освоен только для кабелей с экранами сечением 35 мм², использование этого способа способствовало снижению стоимости кабеля и попутно уменьшало потери.

Для проверки термической стойкости экранов с малым сечением при однофазном КЗ на кабеле с дополнительным проводником в НИЦ ВВА были проведены испытания на кабеле 110 кВ, которые доказали мгновенный переход дуги, возникающей

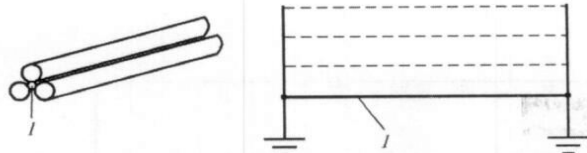


Рис. 5. Схема соединения экранов с дополнительным проводником (I)

при пробое изоляции, на дополнительный проводник, что разгружало экран.

За время эксплуатации более чем 270 км таких кабелей (в однофазном исчислении) не было ни одного случая перегорания экрана кабеля по длине фазы при повреждениях на КЛ.

При определённом обосновании и с некоторой доработкой (применение медного провода, улучшение гидроизоляции узлов соединения и др.) этот способ может найти применение.

В качестве мероприятий по повышению эффективности передачи электроэнергии по КЛ следует учитывать и возможность увеличения пропускной способности КЛ и отдельных её участков за счёт вариации применения схем укладки трёх фаз в плоскости или треугольником. Для оценки эффективности такой вариации в табл. 2 в качестве примера приводятся каталожные данные фирмы АВВ для кабелей 100 – 300 кВ, прокладываемых в земле при стандартных условиях (глубина прокладки 1 м, температура земли 20°C, окружающей среды 35°C, удельное термическое сопротивление земли 1 м·К/Вт, расстояние между фазами при укладке в плоскости 70 мм в свету).

Выводы

1. Параметры и схемы соединения экранов для кабельных линий, выполненных с применением однофазных кабелей, существенно влияют на потери в КЛ. При проектировании КЛ необходимо обосновывать выбор сечения экранов, способа укладки однофазных кабелей и схем соединения экранов.

2. В схемах, допускающих протекание токов по экранам в рабочем режиме, завышение сечения экранов не только ведёт к повышению стоимости кабеля и увеличению потерь при передаче, но и вызывает снижение пропускной способности КЛ, поэтому меры по уменьшению сечения экранов имеют важное значение. Среди них:

расчёт экранов по методике, учитывающей протекание тока КЗ по экрану при повреждении на КЛ; более тщательный подход к определению перспективного расчётного тока КЗ на КЛ.

3. Учитывая достаточно большое разнообразие вариантов параметров и схем соединения экранов, необходимо обоснование выбираемого варианта.

Список литературы

1. *The design of specially bonded cable systems.* – Elektra, 1973, May.
2. Ларина Э. Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии. М.: Энергоатомиздат, 1996.
3. Правила устройства электроустановок. М.: Госэнергонадзор, 2000.

ТЕПЛООБМЕННИКИ

- Пароводяные
- Водоводяные
- Емкостные
- Пластиначатые
- Кожухотрубные
- Вертикальные
- Горизонтальные

ВОДОПОДГОТОВКА

- Очистка
- Осветление
- Умягчение
- Деаэрация
- Атмосферная
- Вакуумная

ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

- Подогреватели мазута
- Холодильник отбора проб
- Сепараторы продувки
- Расширители дренажа
- Баки; Емкости; Резервуары

www.sarzem.ru; e-mail: info@sarzem.ru;
+7(845 2) 22-01-24; 22-02-26; 22-63-84; 52-85-11; факс: 22-01-21
410008; г. Саратов, ул. Большая Садовая, 48;
ОАО "Саратовский завод энергетического машиностроения"

САРЭНЕРГОМАШ

Организация тепла