

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ДИАГРАММА СИЛОВОГО КАБЕЛЯ ДЛЯ АНАЛИЗА АКТИВНЫХ ПОТЕРЬ, ВЛИЯЮЩИХ НА СОСТОЯНИЕ ИЗОЛЯЦИИ

А.В. Коржов, Е.В. Томашева
г. Челябинск, ЮУрГУ

Рассмотрена структура и соотношение активных потерь в силовом кабеле. Определены зависимости для вычисления активных мощностей, выделяемых в изоляции кабеля, от электродинамических усилий жил и собственного электромагнитного поля в различных режимах работы.

При передаче электроэнергии по силовому кабелю возникают активные потери, обусловленные физическими процессами, связанными с преобразованиями энергии, влияющие на текущее состояние изоляции кабеля.

При рассмотрении энергетической диаграммы силового кабеля (рис. 1) следует выделить:

1. $P_{\text{вх}}$ – входную активную мощность, потребляемую кабелем от источника питания;
2. $P_{\text{эл}}$ – мощность, выделяемую в кабеле от электрических потерь;
3. P_E – электрическую мощность, обусловленную ёмкостными токами утечки и тангенсом угла диэлектрических потерь, посредством которой свободные частицы диэлектрика совершают прямолинейное движение вдоль силовых линий электрического поля;
4. $P_{\text{эм}}$ – электромагнитную мощность, обусловленную действием магнитного поля на токи утечки и отклоняющую частицы от прямолинейного движения и заставляющую их совершать спиралевидное движение с общим направлением перемещения вдоль силовых линий электрического поля;
5. $P_{\text{мех}}$ – механическую мощность, обусловленную электродинамическими силами жил кабеля от токов нагрузки и воздействующую на изоляцию кабеля в виде вибраций;
6. $P_{\text{проч}}$ – мощность магнитных потерь в металлических частях кабеля, защитной оболочке и броне;
7. $P_{\text{вых}}$ – выходную активную мощность,

передаваемую от кабеля к нагрузке и представляющую собой разность между входной активной мощностью и суммой потерь.

Проведённый обзор литературных источников не выявил достаточной проработки вопроса, связанного с анализом воздействия на изоляцию силового кабеля собственного электромагнитного поля и электродинамических усилий жил силового кабеля. Научный и практический интерес представляют величины активных мощностей, выделяемых в изоляции кабеля по указанным причинам, для понимания механизмов воздействия на изоляцию и сопоставления с другими активными мощностями, приведенными на энергетической диаграмме кабеля (см. рисунок).

Указанные потери в различной степени влияют на разрушение кабельной изоляции. Активные потери преобразуются в тепловой поток, проходящий от жил через диэлектрик к внешней среде.

Мощность электрических потерь в жилах кабеля определяется по известной формуле:

$$P_{\text{эл}} = I^2 \cdot R. \quad (1)$$

Активная мощность преобразуется в тепловой поток [1]:

$$Q = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta L} \cdot S \cdot t. \quad (2)$$

Изменение теплового потока, проходящего через слои изоляции кабеля в единицу времени, также представляет собой активную мощность и измеряется в [Вт]:

$$P_Q = \frac{dQ}{dt}. \quad (3)$$

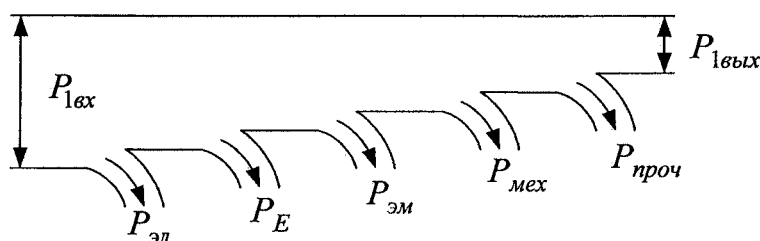


Рис. 1. Энергетическая диаграмма активных потерь в кабеле

Здесь Q – количество теплоты, переданное через слой вещества толщиной ΔL площадью S при поддержании на его плоскостях разности температур ΔT за время t , λ – удельная теплопроводность материала [1, 2]. Процессы разрушения изоляции под действием теплового потока подробно исследованы, например, в [3].

Наличие в технических диэлектриках небольшого числа свободных зарядов, связанных с наличием примесей, либо продуктов окисления, возникающих в результате нагрева в изоляции, приводит к возникновению токов утечки, определяемых в общем случае равенством [4]:

$$I_y = U \cdot \omega \cdot C, \quad (4)$$

где U – напряжение между слоями диэлектрика; ω – угловая частота тока; C – емкость между слоями диэлектрика.

Мощность, выделяемую активной составляющей тока утечки, можно рассчитать по формуле

$$P_E = U \cdot I_y \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (5)$$

где $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

В нагрузочных режимах работы электрического кабеля при протекании по жилам переменного тока, на заряды в диэлектрике дополнительно действует магнитное поле, обусловленное током нагрузки.

Магнитное поле от тока нагрузки в кабеле действует на свободные заряды в виде силы Лоренца. Если предположить, что токи утечки протекают по неким элементарным проводникам, то на такой элементарный проводник будет действовать сила Ампера, определяемая равенством [5, 6]:

$$F_A = B \cdot l_g \cdot I_y, \quad (6)$$

где B – значение магнитной индукции; l_g – длина элементарного проводника, эквивалентная толщине диэлектрика.

Сила Лоренца, действующая на каждый заряд со стороны магнитного поля и сила Ампера, действующая на элементарные проводники с током утечки имеют одинаковую природу, так как упомянутые токи представляют собой направленное движение зарядов, на которые воздействует магнитное поле, обусловленное током нагрузки.

Мощность, выделяемая при совершении работы по перемещению свободных зарядов под действием магнитного поля, $P_{эм}$ равна произведению длины перемещения, частоты сети f и силы, воздействующей на заряды.

Поскольку перемещение зарядов осуществляется между слоями диэлектрика на протяжении всей длины кабеля $L_{жс}$ под действием силы Ампера, то

$$P_{эм} = L_{жс} \cdot F_A \cdot f. \quad (7)$$

Механические потери на одну жилу, обусловленные электродинамическими силами между жилами кабеля от токов нагрузки, представляют собой сумму радиальной P_p и тангенциальной P_m составляющих [7]:

$$P_{мех} = P_p + P_m. \quad (8)$$

Указанные радиальные и тангенциальные составляющие мощности можно рассчитать по формулам (9) и (10):

$$P_p = 0,105 \cdot \frac{1}{\omega \cdot m} \cdot C^2 \cdot I_m^4 \cdot \sin 4\omega t. \quad (9)$$

$$P_m = \left(-\frac{3}{64}\right) \cdot \left(\frac{R_y^2}{\omega \cdot J}\right) \cdot C^2 \cdot I_m^4 \cdot \cos 4\omega t. \quad (10)$$

В таблице представлены расчёты активных мощностей, воздействующих на изоляцию силового кабеля. Рассмотрено два типа силовых кабелей: трёхжильный с бумажно-пропитанной изоляцией; одножильный, уложенный в треугольник с изоляцией из сшитого полиэтилена. Расчёты проведены

Соотношение активных потерь в силовом кабеле

Тип кабеля ААШВ, сечение жилы 120 мм ² ; линейное напряжение 6 кВ; длина 1000 м							
Активная мощность, Вт	P_{lax}	$P_{эл}$	P_E	$P_{эм}$	$P_{мех}$	$P_{проч}$	$P_{lвых}$
I=200 А	1 964 098	31 000	86	2	48	14	1 932 948
Процент к электрическим потерям	–	100	0,28	0,007	0,16	0,04	–
$I_{кз}^{(3)}=3000$ А	29 461 475	6 975 000	86	30	2 438 184	3 077	20 045 098
Процент к электрическим потерям	–	100	0,001	0,0004	35	0,04	–
Тип кабеля: АПВП, сечение жилы 120 мм ² ; линейное напряжение 6 кВ; длина 1000 м							
I=200 А	1 964 098	31 000	0	0	0,3	0	1 933 098
Процент к электрическим потерям	–	100	–	–	0,0009	–	–
$I_{кз}^{(3)}=3000$ А	29 461 475	6 975 000	–	–	13 656	–	22 472 819
Процент к электрическим потерям	–	100	–	–	0,2	–	–

для рабочего режима с током в 200 А и режима трёхфазного короткого замыкания, как наиболее тяжёлого. Анализ полученных соотношений показывает резкий рост активной мощности от электродинамических усилий в аварийном режиме и рост активной мощности от собственного электромагнитного поля по отношению к рабочему режиму, воздействующей непосредственно на свободные заряды в диэлектрике.

Выделяемые активные потери увеличивают температуру кабеля. С повышением температуры происходит расширение твердых тел (жил, изоляции и оболочки кабеля), называемое тепловым расширением [1]. Различают линейное и объемное тепловые расширения, характеризующиеся средними коэффициентами линейного α и объемного β расширений в данном интервале температур.

Если L_0 – первоначальная длина тела, а ΔL – удлинение этого тела при нагревании на Δt градусов, то α в этом интервале температур определяется по формуле:

$$\alpha = \left(\frac{1}{L_0} \right) \cdot \left(\frac{\Delta L}{\Delta t} \right). \quad (11)$$

Величина α характеризует относительное удлинение $\Delta L / L_0$, происходящее при нагревании тела на один градус. Длина нагретого тела определяется:

$$L = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t). \quad (12)$$

Значение α зависит от материала и для большинства тел имеет порядок $10^{-5} - 10^{-6}$ град $^{-1}$.

Объём твердого тела V при нагревании возрастает в первом приближении пропорционально первой степени приращения температуры:

$$V = V_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta t), \quad (13)$$

где V_0 – первоначальный объём тела, β – средний коэффициент объёмного расширения в интервале температур Δt , характеризующий относительное увеличение объёма V / V_0 , происходящее при нагревании тела на один градус:

$$\beta = \left(\frac{1}{V_0} \right) \cdot \left(\frac{\Delta V}{\Delta t} \right). \quad (14)$$

Связь коэффициентов объёмного и линейного расширений

$$\beta = 3\alpha. \quad (15)$$

Рассмотренные активные мощности по-разному влияют на состояние изоляции силового кабеля. Кроме рассмотренного теплового воздействия, обусловленного, как правило, электрическими потерями в жилах, на изоляцию кабеля влияет механическое воздействие от электродинамических усилий.

Несмотря на существенное, в рабочих режимах, численное отличие электрических и механических потерь (см. таблицу), происходит их комбинированное воздействие на изоляцию кабеля.

Разделение потерь энергии в силовом кабеле на основе активных мощностей необходимо для понимания физической природы комбинированного воздействия и моделирования наихудших условий эксплуатации изоляции при проведении ресурсных испытаний.

Литература

1. Яворский, Б.М. *Справочник по физике для инженеров и студентов вузов* / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – М.: Наука, 1979.
2. Кошкин, Н.И. *Справочник по элементарной физике* / Н.И. Кошкин, М.Г. Ширкевич. – М.: Наука, 1974.
3. Леонов, В.М. *Основы кабельной техники: учебник для студ. высш. учебн. заведений* / В.М. Леонов, И.Б. Пешков, И.Б. Рязанов, С.Д. Холодный; под ред. И.Б. Пешкова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 432 с.
4. Привезенцев, В.А. *Основы кабельной техники* / В.А. Привезенцев, И.И. Гроднев, С.Д. Холодный, И.Б. Рязанов; под ред. В.А. Привезенцева. – М.-Л.: Энергия, 1967.
5. Вольдек, А.И. *Электрические машины* / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978.
6. Коржов, А.В. *Тепловой расчёт силового электрического кабеля с учётом потерь от вихревых токов в защитной металлической оболочке* / А.В. Коржов, Е.В. Томашева // Труды II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии». – Тольятти: Изд-во Тольяттинский государственный университет, 2007. – Часть 1. – С. 134–136.
7. Коржов, А.В. *Электродинамическое взаимодействие жил трёхфазного силового кабеля* / А.В. Коржов, Е.В. Томашева // *Электробезопасность*. – 2006. – № 3–4. – С. 15–24.

Коржов Антон Вениаминович, к.т.н., доцент кафедры ЭССиС, окончил ЮУрГУ в 2000 г. по специальности «Электроэнергетические системы и сети». В 2003 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме: «Обоснование и разработка регламента для электрических полей промышленной частоты». Область научных интересов: электромагнитные процессы в кабельных сетях, оценка остаточного ресурса изоляции силовых кабелей.

Томашева Евгения Викторовна, окончила ЮУрГУ в 2004 г. по специальности «Электроэнергетические системы и сети». Область научных интересов: изучение состояния изоляции силовых кабельных линий под воздействием эксплуатационных факторов.