

ОЦЕНКА УРОВНЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ 6–10 кВ

Докт. техн. наук, проф. КОРОТКЕВИЧ М. А., асп. ОКЕМБА ИТУМБА ФОСТЕН

Белорусский национальный технический университет

При выборе испытательного напряжения необходимо руководствоваться следующими положениями [1]:

- испытательное напряжение должно быть выше уровня воздействующих на изоляцию кабеля перенапряжений;
- испытательное напряжение не должно вызывать перекрытий концевых разделок кабеля;
- испытательное напряжение не должно быть опасным для изоляции оборудования сети, которое одновременно подвергается его воздействию.

Известно, что кабельные линии напряжением 6–10 кВ в городской электрической сети работают в условиях изолированной или компенсированной нейтрали. Важнейшее преимущество систем с изолированной и компенсированной нейтралью состоит в сохранении электроснабжения потребителей при длительных (2...6 ч) однофазных замыканиях на землю. Однако в этом случае напряжения неповрежденных фаз возрастают до линейных значений. Особую опасность представляют перенапряжения, возникающие в результате дуговых замыканий на землю. По величине такие перенапряжения достигают до 3,6 от фазного напряжения сети или до двух линейных значений. Продолжительные перенапряжения весьма опасны для изоляции сети.

В сетях с изолированной и компенсированной нейтралью имеют место и значительные коммутационные перенапряжения длительностью от одного до нескольких полупериодов промышленной частоты, возникающие за счет энергии реактивных элементов сети (индуктивности и емкости) при включении и отключении коммутационными аппаратами оборудования или линий.

Уровень испытательного напряжения, прикладываемого к фазной изоляции кабельной ли-

нии напряжением 10 кВ, в 20-е гг. составлял 20 кВ. Далее величина испытательного напряжения увеличивалась до 30, 50 и 60 кВ. Это позволило снизить повреждаемость кабельных линий под рабочим напряжением λ_a с 15 (при испытательном напряжении 20 кВ) до 10; 3 и 2 повр/100 км/год (при испытательных напряжениях соответственно 30, 50 и 60 кВ) [2]. По этим данным можно получить нелинейную аналитическую зависимость $\lambda_a = f(U_{исп})$ в виде

$$\lambda_a = a U_{исп}^{-\alpha}, \quad (1)$$

где a , α – искомые коэффициенты; $U_{исп}$ – величина испытательного напряжения, кВ.

В соответствии с методом наименьших квадратов система уравнений, обеспечивающая нахождение неизвестных коэффициентов a и α , выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} n \lg a + \alpha \sum_{i=1}^n \lg U_{исп i} = \sum_{i=1}^n \lg \lambda_{ai}; \\ \left(\sum_{i=1}^n \lg U_{исп i} \right) \lg a + \alpha \sum_{i=1}^n \lg^2 U_{исп i} = \sum_{i=1}^n (\lg U_{исп i} \lg \lambda_{ai}), \end{cases} \quad (2)$$

где n – число членов статистического ряда (в нашем примере $n = 4$).

Подставив указанные выше значения $U_{исп i}$ и λ_{ai} в уравнения (2), получим: $a = 2046$; $\alpha = -1,65$.

Тогда зависимость $\lambda_a = f(U_{исп})$ может быть представлена как

$$\lambda_a = 2046 U_{исп}^{-1,65}. \quad (3)$$

Расчеты, выполненные по формуле (3), дают следующие теоретические значения λ_a : 14,66;

7,50; 3,25; 2,39 повр/100 км/год. Погрешность результата составляет около 19 %, что объясняется малой представительностью выборки значений λ_a .

В настоящее время кабели напряжением 6–10 кВ после их прокладки должны выдерживать испытание в течение 10 мин постоянным напряжением шестикратной величины, т. е. кабели 6 кВ – напряжением 36 кВ; 10 кВ – напряжением 60 кВ. В процессе эксплуатации продолжительность испытаний составляет 5 мин. Большие трудозатраты на выполнение ремонтных работ повредившихся при испытаниях кабелей обусловили необходимость анализа применяемого уровня испытательного напряжения для кабельных линий. Закономерно предположить, что в процессе эксплуатации кабельных линий запас электрической прочности изоляции k_3 с течением времени t снижается за счет теплового и электрического старения изоляции и ее увлажнения. Пусть у вновь проложенного кабеля запас электрической прочности изоляции в относительных единицах равен единице, т. е. $k_{3*} = 1,0$. С этим коэффициентом запаса прочности кабель выдерживает шестикратное испытательное напряжение. Допустимо также предположить, что по истечении срока службы (50 лет – кабели со свинцовой оболочкой; 25 лет – с алюминиевой; 20 лет – с пластмассовой изоляцией) первоначальный запас электрической прочности израсходуется. Такие кабели могут продолжать успешно работать в условиях исключения воздействия на них различного рода перенапряжений без плановых испытаний.

Характер снижения коэффициента запаса электрической прочности изоляции кабеля в относительных единицах k_{3*} может быть представлен в виде:

- линейной зависимости

$$k_{3*} = 1 - \frac{t}{t_c} = 1 - t_*, \quad (4)$$

где t_* , t – продолжительность эксплуатации кабельной линии в относительных и абсолютных (лет) единицах измерения; t_c – нормативный срок службы кабеля, лет;

- экспоненты, т. е. аналогично изменению вероятности безотказной работы кабельной линии с увеличением срока эксплуатации

$$k_{3*} = e^{-at_*}; \quad (5)$$

- окружности

$$k_{3*}^2 = 1 - t_*^2; \quad k_{3*} = \sqrt{1 - t_*^2}; \quad (6)$$

- косинусоиды

$$k_{3*} = \cos t_* \frac{\pi}{2}. \quad (7)$$

Зависимости $k_{3*} = f(t_*)$, построенные по формулам (5)–(7), приведены на рис. 1.

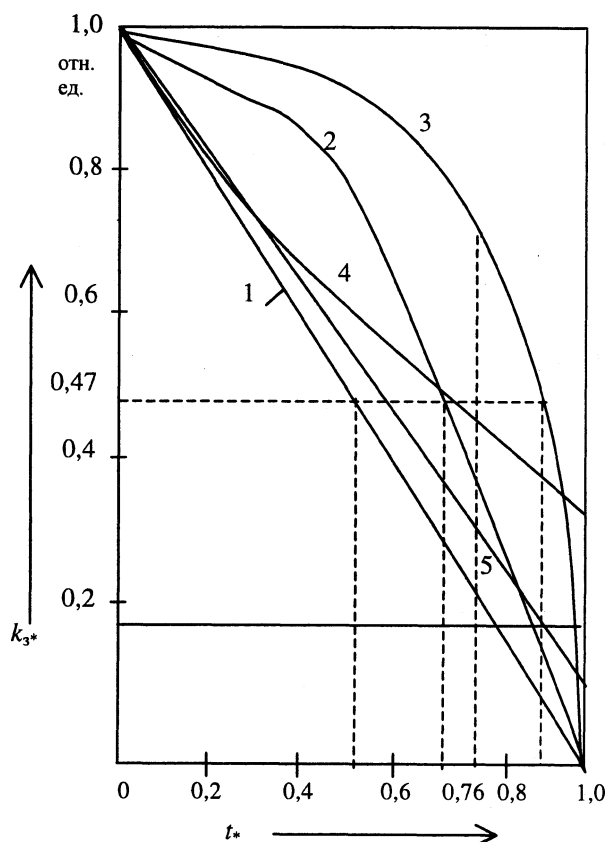


Рис. 1. Изменение коэффициента запаса электрической прочности изоляции кабеля от продолжительности его эксплуатации: 1 – $k_{3*} = 1 - t_*$; 2 – $k_{3*} = \cos t_* \frac{\pi}{2}$;

$$3 - k_{3*} = \sqrt{1 - t_*^2}; \quad 4 - k_{3*} = e^{-t_*}; \quad 5 - k_{3*} = e^{-at_*}.$$

Как уже указывалось, уровень испытательного напряжения должен быть пропорционален коэффициенту запаса электрической прочности изоляции и не ниже двух линейных значений напряжения переменного тока, т. е. 12 кВ (для кабелей 6 кВ) и 20 кВ (для кабелей 10 кВ). Испытательное напряжение постоянного тока будет равно 17 кВ (для кабелей напряжением 6 кВ) и 28 кВ (для кабелей напряжением 10 кВ). Этим значениям испытательного напряжения соответствует коэффициент запаса электрической прочности изоляции, равный 0,47, т. е. расход запаса прочности изоляции составляет 53 %. Указанному значению k_{3*} соответствуют относительные сроки службы кабеля: 0,53 (при линейном законе изменения k_{3*} во времени), 0,68 (при законе изменения k_{3*} во времени по косинусоиду), 0,76 (при экспоненциальном законе изменения k_{3*} во времени) и 0,87 (при законе изменения k_{3*} во времени по окружности).

Среднее значение относительного срока службы кабеля, соответствующего коэффициен-

ту запаса электрической прочности изоляции, равному 0,47, составляет 0,72, что адекватно экспоненциальному закону изменения k_{3*} во времени. Как известно, снижение электрической или механической прочности технических систем во времени подчиняется экспоненциальному закону. Тогда уровень испытательного напряжения $U_{\text{исп}}$ оценивается по выражению

$$U_{\text{исп}} = U_{\text{исп}}^{\text{норм}} k_{3*} = U_{\text{исп}}^{\text{норм}} e^{-at}, \quad (8)$$

где $U_{\text{исп}}^{\text{норм}}$ – нормативное значение испытательного напряжения постоянного тока (36 кВ – для кабелей 6 кВ; 60 кВ – для кабелей 10 кВ).

Зависимость $U_{\text{исп}}$ от относительного срока службы кабеля в соответствии с формулой (8) приведена в табл. 1, где видно, что чем продолжительнее эксплуатируется кабельная линия, тем ниже должен быть уровень испытательного напряжения.

Таблица 1

Зависимость испытательного напряжения от относительного срока службы кабеля

t_*	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,76	0,8	0,9	1,0	Примечание
t , лет, при $t_c = 50$ лет	0	5	6	15	20	25	30	35	38	40	45	50	
t , лет, при $t_c = 25$ лет	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	19	20	22,5	25	
$U_{\text{исп}}$, кВ	60	54	49	44	40	37	33	30	28	28	28	28	
$U_{\text{исп}}$, кВ	36	32	30	27	24	22	20	18	17	17	17	17	Кабели 6 кВ

Испытывать кабельную линию ниже напряжений 28 кВ (кабели 10 кВ) и 17 кВ (кабели 6 кВ) постоянного тока не имеет смысла, так как в переходном режиме при однофазных замыканиях на землю перенапряжения в сети могут достигать значений, равных двум линейным напряжениям переменного тока, или 28 кВ постоянного тока (кабели 10 кВ) и 17 кВ постоянного тока (кабели 6 кВ).

ВЫВОДЫ

1. Уровни испытательного напряжения постоянного тока для кабелей напряжением 6–10 кВ должны устанавливаться дифференцированно в

зависимости от продолжительности эксплуатации кабельных линий.

2. Минимальный уровень испытательного напряжения, определенный исходя из воздействующих на изоляцию кабеля перенапряжений при однофазных замыканиях в сети с изолированной нейтралью, должен быть равен 28 кВ (для кабелей напряжением 10 кВ) и 17 кВ (для кабелей напряжением 6 кВ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кучинский Г. С., Кизеветтер В. Е., Пинталь Ю. С. Изоляции установок высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Опыт эксплуатации кабельных линий / Под. ред. В. А. Козлова. – Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1974.