

УДК 621.317.39

Л.В. Денисов, С.Р. Зиборов

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, Стрелецкая балка, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: rt.sevgtu@stel.sebastopol.ua

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ

Проанализированы законы распределения вероятности параметров тока короткого замыкания трехфазной сети. Рассмотрены требования к коммутационной стойкости трехфазных высоковольтных выключателей. Проведено сравнение условий испытаний выключателей в трехфазной прямой и в однофазной синтетической схемах. Предложен расчет числа циклов включения-отключения и соответствующих им значений испытательного тока.

Одним из основных параметров трехфазного высоковольтного выключателя является ресурс по коммутационной стойкости (далее коммутационный ресурс), который определяется ГОСТом 687-78 [1] как допустимое число операций отключения тока короткого замыкания (КЗ) без осмотра и ремонта дугогасительного устройства при заданном отношении числа отключений к числу включений тока КЗ.

Для каждого типа выключателя ГОСТ 687-78 нормирует минимальный коммутационный ресурс $N_{\min}$ и диапазон действующих значений периодической составляющей тока отключения от $0,6I_n$ до I_n , где I_n – номинальный ток отключения. Поэтому изготовители выключателей задают, как правило, коммутационный ресурс N и ток отключения I_o не менее $N_{\min}$ и I_n соответственно.

Однако ГОСТ 687-78 не разъясняет, какое число циклов включения-отключения (В-О) и с какими значениям токов включения I_v и отключения I_o необходимо выполнить в пределах коммутационного ресурса при проведении испытаний в синтетической однофазной схеме.

Особенностью синтетической однофазной схемы является то, что в ней полюсы (конструктивные части трехфазного выключателя, каждая из которых содержит пару контактов, отключающую соответствующий фазный ток) испытывают по отдельности. В процессе испытаний выключателя на коммутационный ресурс с помощью испытываемого полюса выполняют циклы В-О. Каждый цикл В-О состоит из двух последовательно выполняемых операций включения и отключения испытательного тока в виде затухающего колебания

$$I_{\text{исп}} \approx I_{\text{max}} e^{-\frac{t}{\tau_y}} \sin \omega_c t, \quad (1)$$

где τ_y – постоянная времени колебательного LC-контура, формирующего испытательный ток; I_{max} – постоянный коэффициент, имеющий размер-

ность тока; ω_p – резонансная частота формирующего LC-контура, которую устанавливают близкой к частоте ω_c сети.

При этом за величину испытательного тока принимают амплитуду первой полуволны $I \approx I_{\max} \exp(-T_c/4\tau_y)$ колебания (1), где T_c – период напряжения сети.

Таким образом, при составлении программы испытаний выключателя на коммутационный ресурс в синтетической однофазной схеме стоит задача определения числа циклов В-О и соответствующих им значений испытательных токов включения и отключения, максимально близких к условиям испытаний в прямой трехфазной схеме.

Поскольку в промышленной сети сопротивление цепи КЗ носит, как правило, активно-индуктивный характер, то фазный ток КЗ имеет вид [2]

$$i = I_m \sin(\omega_c t + \psi - \varphi) - I_m e^{-t/\tau_{кз}} \sin(\psi - \varphi) = i_n + i_a, \quad (2)$$

где I_m – амплитуда периодической составляющей тока; ψ – начальная фаза фазного напряжения в момент включения КЗ; φ и $\tau_{кз}$ – аргументы полного сопротивления и постоянная времени цепи КЗ; $i_n = I_m \sin(\omega_c t + \Phi)$ и $i_a = I_m \exp(-t/\tau_{кз}) \sin \Phi$ – соответственно периодическая и аperiodическая составляющие тока; $\Phi = \psi - \varphi$ – начальная фаза периодической составляющей тока;

Значение испытательного тока включения выбирают равным модулю максимального значения тока КЗ (2), которое имеет место в момент t_g первого совпадения знаков аperiodической составляющей тока i_a и максимума периодической составляющей тока i_n ,

$$I_g = I_m [1 + \beta_n e^{-\frac{t_g}{\tau_{кз}}}], \quad (3)$$

где $\beta_n = |\sin \Phi|$ – модуль нормированного начального значения аperiodической составляющей тока (рисунок 1).

Момент t_g определяется решением уравнения

$$\omega_c t_g + \Phi = \begin{cases} 3\pi/2 & \text{при } 0 < \Phi \leq \pi; \\ 5\pi/2 & \text{при } \pi < \Phi < 2\pi. \end{cases}$$

Откуда

$$t_g = \begin{cases} \frac{3\pi - 2\Phi}{4\pi} T_c & \text{при } 0 < \Phi < \pi; \\ \frac{5\pi - 2\Phi}{4\pi} T_c & \text{при } \pi < \Phi < 2\pi. \end{cases} \quad (4)$$

Из рисунка 1 видно, что величина β_n принимает максимальное значение $\beta_{n\max} = 1$ при значениях аргумента $\Phi = \pi/2$ и $\Phi = 3\pi/2$, которым с учетом (4) соответствует $t_0 = T_c/2 = 10$ мс.

С учётом (2) значение испытательного тока отключения определяют в виде

$$I_o = I_m [1 + \beta_n e^{-t_o/\tau_{кз}}] = I_m [1 + \beta_n \beta_o], \quad (5)$$

где t_o – момент максимума тока отключения выключателя; $\beta_o = e^{-t_o/\tau_{кз}}$ – содержание аperiodической составляющей в момент t_o относительно ее начального значения β_n .

Обычно постоянную времени цепи КЗ выбирают равной $\tau_{кз} \approx 45$ мс, а момент t_o – таким, чтобы получить относительное содержание аperiodической составляющей $\beta_o = 0,4$ [1].

Поскольку момент возникновения КЗ и параметры цепи КЗ являются случайными величинами с неизвестными характеристиками, то наиболее корректным представляется предположение о равномерной плотности распределения вероятности следующих величин:

- собственного времени t_c отключения выключателя на интервале $[t_c - \Delta t_c; t_c + \Delta t_c]$, где Δt_c – нестабильность величины t_c ;
- амплитуды I_m периодической составляющей тока КЗ;
- начальной фазы Φ периодической составляющей тока КЗ.

Кроме того, следует полагать равную вероятность возможного направления (прямого или обратного) фазного тока в момент включения или отключения тока КЗ выключателем в реальных условиях эксплуатации.

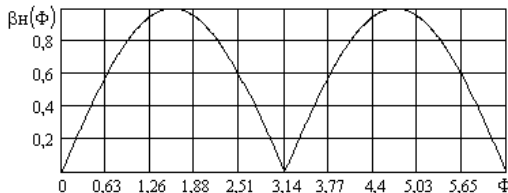


Рисунок 1 - Зависимость β_n от начальной фазы Φ тока КЗ

Поскольку нестабильность собственного времени отключения современных выключателей $\Delta t_c \ll \tau_{кз} \approx 45$ мс, то ее влиянием на ток отключения можно в первом приближении пренебречь.

Исходя из равенства вероятностей прямого и обратного направлений тока в момент возникновения КЗ, при испытании выключателей на коммутационный ресурс необходимо следующее:

- выполнять чётное число операций включения и отключения испытательного тока;
- проводить испытания в виде серий пар циклов В-О;
- выполнять пары циклов В-О одной серии с одинаковыми значениями

ми токов включения и отключения

- во втором цикле каждой пары выполнять операции включения и отключения с испытательными токами, имеющими такие же значения, как в первом цикле пары, но противоположные направления.

С учетом вышесказанного общее число циклов В-О с одним направлением тока следует определять в виде

$$N_o = \text{Int}(N/2) . \quad (6)$$

Так как нормированная амплитуда периодической составляющей тока КЗ

$$\gamma = I_m / I_n \sqrt{2} \quad (7)$$

изменяется в соответствии с ГОСТ1687-78 от $\gamma_{\min}=0,6$ до $\gamma_{\max}=1$, то распределение плотности вероятности величины γ

$$p(\gamma) = \frac{1}{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}} = 2,5 . \quad (8)$$

С учётом (8) находим распределение вероятности величины γ (рисунок 2)

$$P(\gamma) = \begin{cases} 0 & \text{при } \gamma \leq 0; \\ 2,5(\gamma - 0,6) & \text{при } 0,6 \leq \gamma \leq 1; \\ 1 & \text{при } \gamma \geq 1. \end{cases} \quad (9)$$

Так как фаза ψ напряжения в момент включения КЗ может изменяться от 0 до 2π , то начальная фаза Φ периодической составляющей тока КЗ имеет равномерное распределение плотности вероятности

$$p(\Phi) = \frac{1}{2\pi} . \quad (10)$$

Поскольку фаза Φ не коррелирована с амплитудой I_m периодической составляющей тока КЗ, то достаточно учесть влияние фазы Φ только на аperiodическую составляющую тока КЗ (2).

Определим функцию $\Phi(\beta_n)$, обратную $\beta_n = |\sin \Phi|$, на интервале $[0, 2\pi]$:

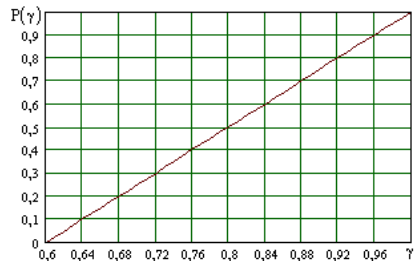


Рисунок 2 - Распределение вероятности нормированной амплитуды тока γ

$$\Phi = \begin{cases} \Phi_1 = \arcsin(\beta_n) & 0 \leq \Phi \leq \pi/2; \\ \Phi_2 = \pi - \arcsin(\beta_n) & \pi/2 \leq \Phi \leq \pi; \\ \Phi_3 = \pi + \arcsin(\beta_n) & \pi \leq \Phi \leq 3\pi/2; \\ \Phi_4 = 2\pi - \arcsin(\beta_n) & 3\pi/2 \leq \Phi \leq 2\pi. \end{cases}$$

Тогда распределение плотности вероятности величины β_n равно

$$p(\beta_n) = \sum_{i=1}^4 p(\Phi_i) \left| \frac{d\beta_n}{dx_i} \right|_{x_i = \Phi_i(\beta_n)} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{|\cos(\pi - \arcsin \beta_n)|} + \frac{1}{2\pi} \frac{1}{|\cos(\pi + \arcsin \beta_n)|} + \frac{1}{2\pi} \frac{1}{|\cos(\arcsin \beta_n)|} + \frac{1}{2\pi} \frac{1}{|\cos(2\pi - \arcsin \beta_n)|} = \frac{2}{\pi |\cos(\arcsin \beta_n)|} = \frac{2}{\pi \sqrt{1 - \beta_n^2}}. \quad (11)$$

Используя (11), находим распределение вероятности (рисунок 3) величины β_n :

$$P(\beta_n) = \begin{cases} 0 & \text{при } \beta_n < 0; \\ \frac{2}{\pi} \arcsin \beta_n & \text{при } 0 \leq \beta_n \leq 1; \\ 1 & \text{при } \beta_n > 1. \end{cases} \quad (12)$$

Из (10) следует, что наиболее вероятным начальным значением аперидической составляющей тока КЗ является $i_a(0) \approx 0,71 I_m \approx I_{ном}$.

Рассмотрим на плоскости с координатами γ и β_n область ABCD, соответствующую заданным пределам изменения величин γ и β_n (рисунок 4).

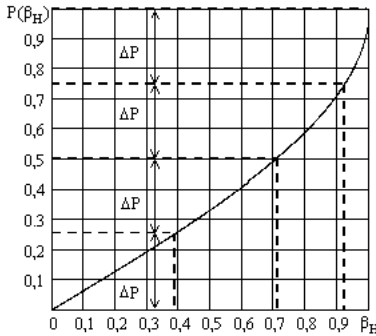


Рисунок 3 – Распределение вероятности величины β_n

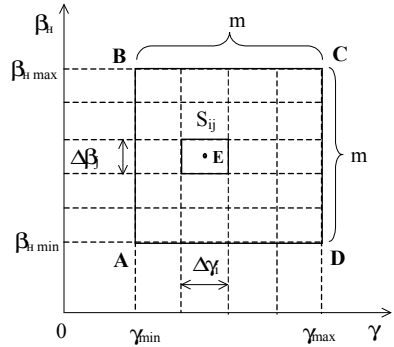


Рисунок 4 – Плоскость испытательного тока

Поскольку каждая точка рассматриваемой плоскости однозначно соответствует одному из возможных значений как испытательного тока включения I_e (3), так и испытательного тока отключения I_o (5), то эту плоскость целесообразно назвать плоскостью испытательного тока.

Для определения необходимого числа испытательных циклов В-О и соответствующих им значений токов включения и отключения одного направления целесообразно разбить область ABCD на элементарные

участки, число которых должно быть не менее N_o (6) и вероятность попадания в которые одинакова для всех участков. Если диапазоны изменения величин γ и β_n разбить на m интервалов, то область ABCD распадается на m^2 элементарных областей.

С учетом (6) число m следует выбирать из условия:

$$m = \begin{cases} \text{Int}\sqrt{N_o} ; \\ 1 + \text{Int}\sqrt{N_o} . \end{cases} \quad (13)$$

Из двух возможных значений m (13) следует выбирать такое, которое обеспечивает минимальное значение модуля разности $|N - 2m^2|$, где N – декларируемый коммутационный ресурс.

В случае выполнения условия $m^2 < N$ для обеспечения полноты испытаний необходимо провести дополнительных циклы В-О, число которых определяется соотношением

$$n_{don} = N - 2m^2 . \quad (14)$$

При этом фактическое число выполняемых циклов В-О запишется как

$$N_\phi = \begin{cases} 2m^2 & \text{при } m^2 \geq N ; \\ 2(m^2 + n_{don}) & \text{при } m^2 < N . \end{cases} \quad (15)$$

Вероятность, соответствующая середине j -го интервала $\Delta\beta_j$ (рисунок 3), равна

$$P_j = \frac{(j + 0,5)}{m} .$$

Так как на интервале $0 \leq \beta_n \leq 1$ функция, обратная (12), имеет вид

$$\beta_n = \sin \frac{\pi \cdot P(\beta_n)}{2} , \quad (16)$$

то средневероятное значение величины β_n , соответствующее интервалу $\Delta\beta_j$, запишется как

$$\bar{\beta}_{nj} = \sin \frac{\pi P_j}{2} = \sin \frac{\pi(j + 0,5)}{2m} , \quad (17)$$

где $j=0, 1, \dots, (m-1)$.

Точка E с координатами, равными средневероятным значениям γ и β_n на интервалах $\Delta\gamma_i$ и $\Delta\beta_{nj}$ соответственно (рисунок 4), определяет средневероятные значения испытательного тока включения $I_{ijв}$ и отключения $I_{ijо}$.

Из (9) и (16) следует, что равным приращениям вероятности $\Delta P = 1/m$ соответствуют равные приращения величины γ и неравные приращения величины β_n .

Используя выражения (3)–(5), (12)–(17), определяем для участка S_{ij} (рисунок 4) нормированные средневероятные значения испытательного тока включения

$$\frac{I_{ij\phi}}{I_n} = \sqrt{2} \left[0,4 + \frac{0,6(i + 0,5)}{m} \right] \cdot \left[1 + e^{-t_e/\tau_{кз}} \sin \frac{\pi(j + 0,5)}{2m} \right] \quad (18)$$

и испытательного тока отключения

$$\frac{I_{ijo}}{I_n} = \sqrt{2} \left[0,4 + \frac{0,6(i + 0,5)}{m} \right] \cdot \left[1 + \beta_o \sin \frac{\pi(j + 0,5)}{2m} \right]. \quad (19)$$

Например, для $N=30$, $t_e=20$ мс, $\beta_o=0,4$ получаем $m=4$, $N_\phi=32$. Результаты расчёта средневероятных нормированных значений испытательного тока отключения (19), выполненные для указанного выше случая, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчёта средневероятных нормированных значений испытательного тока отключения

j/i	0	1	2	3
0	0,991	1,143	1,296	1,448
1	1,124	1,296	1,469	1,642
2	1,225	1,413	1,602	1,790
3	1,280	1,477	1,674	1,871

Поскольку испытательное оборудование имеет конечную погрешность измерения испытательного тока, то нормированные значения испытательного тока отключения (таблица 1) целесообразно объединить в группы так, чтобы отклонение каждого из значений группы от среднего значения этой группы не превышало заданной погрешности. Тогда для каждой группы можно рассчитать средние значения испытательного тока отключения и соответствующее им число циклов В-О с одним направлением тока. Результаты такого расчета, выполненного для погрешности 5% при $m=4$, $N_\phi=32$, $I_n=20$ кА, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчета среднего значения испытательного тока отключения и соответствующего им числа циклов В-О с одним направлением тока

Номер группы	Нормированное среднее значение тока отключения	Среднее значение тока отключения, кА	Число циклов В-О
1	0,977	19,6	2
2	1,08	20,2	2
3	1,20	24,0	4
4	1,32	26,4	6
5	1,46	29,2	8

Номер группы	Нормированное среднее значение тока отключения	Среднее значение тока отключения, кА	Число циклов В-О
6	1,61	32,2	6
7	1,78	35,6	4

Дополнительные циклы В-О целесообразно выполнять так же, как и основные циклы, попарно с противоположными направлениями испытательного тока в циклах одной пары. Для ужесточения режима испытаний операцию отключения в дополнительных циклах В-О следует выполнять при максимальном значении испытательного тока, например, 35,6 кА (таблица 2).

Для каждой группы циклов В-О, указанной в таблице 2, можно рассчитать значения испытательного тока включения (3). Так как испытательные циклы В-О выполняют с поочередным изменением направления тока, то для расчета значения t_a (4) достаточно найти с учетом (17) значение аргумента $\Phi = \pi - \arcsin \bar{\beta}_{nj}$, которому соответствует большее значение испытательного тока включения.

На основании выполненного анализа можно дать следующие рекомендации для проведения испытаний трехфазных выключателей на коммутационный ресурс в синтетической однофазной схеме:

1) число выполняемых отключений испытательного тока должно быть чётным, что обеспечивает равномерную нагрузку контактов каждого полюса отключением токов противоположных направлений;

2) при расчете испытательного тока в однофазной синтетической схеме выбор начального значения аperiodической составляющей тока, равным амплитуде периодической составляющей этого тока, соответствует более жестким условиям испытаний по сравнению с прямой трехфазной схемой;

3) при равномерном распределении вероятности фазы тока КЗ среднее начальное значение аperiodической составляющей тока КЗ не превышает 64% от амплитуды его периодической составляющей;

4) при испытании выключателей с большим декларируемым коммутационным ресурсом необходимо увеличивать в процентном отношении число циклов В-О, в которых значение испытательного тока отключения превышает $1,5 I_n$.

Полученные результаты могут служить основой для составления методик испытаний на коммутационный ресурс мощных высоковольтных выключателей, а также для прогнозирования параметров аварийных режимов работы промышленной трехфазной сети. Найденные вероятные значения тока позволяют выполнить испытания трехфазного выключателя на ресурс по коммутационной стойкости в синтетической однофазной схеме в условиях, максимально близких к условиям испытаний выключателя в прямой трехфазной схеме.

Библиографический список

1. ГОСТ 687-78. Выключатели переменного тока на напряжение 1000 В. Введ. 01.01.80. — М.: Изд-во стандартов, 1994. — 105 с.
2. Атабеков Г.И. Основы теории цепей / Г.И.Атабеков. — М.: Энергия, 1969. — 424 с.

Поступила в редакцию 3.01.2003 г.