

**ГАШЕНИЕ ДУГИ ПРИ НАЛИЧИИ КОНДЕНСАТОРА В ЦЕПИ  
ДУГОГАСЯЩЕЙ КАТУШКИ**

П. Т. АНОХИН

(Представлена научным семинаром кафедры электрических станций)

Защита от замыканий на землю со стопроцентным охватом обмотки статора блочного генератора с использованием вспомогательного источника постоянного тока имеет свои особенности. Схема включения устройства для защиты РЗ показана на рис. 1, а. Дугогасящая катушка

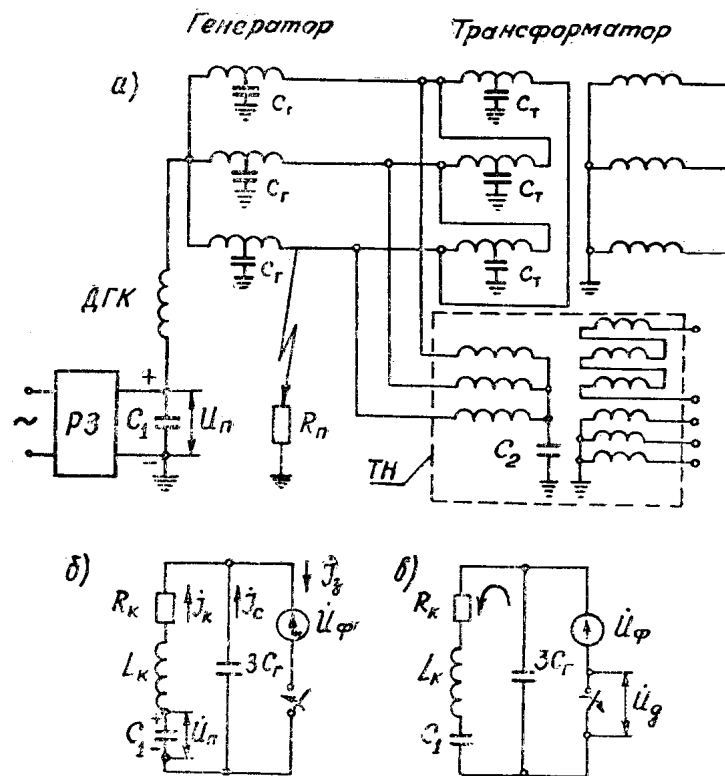


Рис. 1. Схема замещения для исследования характера переходного процесса при замыкании на землю в цепи генератора: а—расчетная схема; б—схема замещения нулевой последовательности при замыкании на землю; в—схема замещения нулевой последовательности после обрыва дуги

ка ДГК и нулевая точка высоковольтной обмотки трансформатора напряжения ТН, подлежащая заземлению по условиям его работы, за-

землены соответственно через конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$ . Заземление можно выполнить и через один конденсатор, как это показано в работе [1].

По принципу действия защита очень проста. Основными узлами РЗ являются источник постоянного тока и измерительный орган.

В нормальном режиме конденсаторы  $C_1$ ,  $C_2$  и емкости генератора и трансформатора по отношению к земле  $C_r$  и  $C_T$  находятся под потенциалом источника постоянного тока. При замыкании на землю в любой точке цепи генераторного напряжения в измерительном органе протекает постоянный ток, зависящий от величины переходного сопротивления в месте замыкания  $R_n$ . Применение поляризованных реле позволяет выполнить защиту, чувствительную к замыканиям через переходные сопротивления порядка 300 *ком* и более при напряжении источника  $U_n \approx 300$  в. Величина постоянного тока может быть ограничена внутренним сопротивлением схемы РЗ до необходимой величины, например, 40—50 *ма*.

Заземление нейтрали генератора через дугогасящую катушку решает две основные проблемы. Во-первых, существенно уменьшается ток в месте замыкания в установившемся режиме и, во-вторых, уменьшается скорость восстановления напряжения  $U_d$  на дуговом промежутке после обрыва дуги.

Настройка дугогасящей катушки обычно выполняется с небольшой перекомпенсацией, поэтому включение конденсатора  $C_1$  приводит к некоторому увеличению тока в месте замыкания  $J_3$ . Ток  $J_3$  можно ограничить как увеличением емкости конденсатора  $C_1$ , так и путем изменения отпайки дугогасящей катушки. Однако, что более существенно, последовательное включение емкости  $C_1$  и индуктивности катушки  $L_k$  является предпосылкой для качественного изменения характера переходного процесса при замыкании на землю в цепи генератора. В связи с этим необходимо дать оценку условий гашения дуги в месте повреждения с учетом процесса восстановления напряжения  $U_d$  на дуговом промежутке после обрыва дуги.

Подробный анализ переходного процесса при замыкании на землю дан в работе [2]. Мы этого вопроса касаемся лишь постольку, поскольку наличие конденсатора  $C_1$  в цепи катушки оказывает влияние на переходный процесс.

Свободная составляющая емкостного тока  $J_c''(t)$  имеет характер быстрозатухающих колебаний средней частоты  $\omega_c'$ , которая в несколько раз превышает основную частоту  $\omega$  [2].

Свободная составляющая тока дугогасящей катушки  $J_k''(t)$  затухает значительно медленнее, чем  $J_c''(t)$ . Катушка на ток  $J_c''(t)$  практически не влияет [4], поэтому эти два процесса будем рассматривать отдельно и ограничимся определением тока  $J_k''(t)$ .

На рис. 1, б приведена схема замещения нулевой последовательности для определения тока  $J_k''(t)$ . При ее составлении приняты следующие допущения:

1) сопротивление нулевой последовательности генератора не учитываем, так как оно по сравнению с сопротивлением дугогасящей катушки очень мало;

2) трехфазную систему считаем симметричной; но в нормальном режиме потенциал нейтрали равен напряжению источника постоянного тока  $U_n$ ;

3) подпиткой от источника постоянного тока пренебрегаем.

Проведенный нами анализ показывает, что при металлическом замыкании на землю ( $R_n = 0$ ) переходный процесс в цепи катушки

практически всегда имеет характер колебаний низкой частоты  $\omega_n$ , которая в несколько раз меньше основной частоты  $\omega$ .

Полный ток в месте замыкания определяется выражением

$$I_3(t) = I_3'(t) + I_3''(t), \quad (1)$$

где  $I_3'(t)$  и  $I_3''(t)$  — соответственно принужденная и свободная составляющие тока замыкания на землю

$$I_3'(t) = I_k''(t) + I_c''(t). \quad (2)$$

Ток  $I_3(t)$  зависит от напряжения поврежденной фазы в момент замыкания, то есть от начальной фазы  $\Psi$ .

Приводим приближенные выражения составляющих тока  $I_3(t)$  для наиболее характерных случаев, а именно:  $\psi = \frac{\pi}{2}$  и  $\psi = 0 \infty$ . Расчеты выполняем в относительных единицах. В качестве базисных величин принимаем амплитуды емкостного тока  $J_{mc}$  и фазного напряжения  $U_{m\phi}$  генератора.

Вводим сокращенные обозначения:

$$K_1 = \frac{1}{3\omega^2 L_k C_r} \text{ — степень настройки колебательного контура;}$$

$$V_1 = 1 - K_1 \text{ — степень расстройки того же контура;}$$

$$d_k = \frac{R_k}{\omega L_k} \text{ — коэффициент, характеризующий потери в медной и стальной сердечнике катушки;}$$

$$K_c = \frac{3C_r}{C_1}; \quad K_n = \frac{U_n}{U_{m\phi}}; \quad \omega_n = \sqrt{\omega_{no}^2 - \delta^2};$$

$$\omega_{no} = \frac{1}{\sqrt{L_k \cdot C_1}}; \quad \delta = \frac{R_k}{2L_k} = \frac{d_k}{2} \omega;$$

$$\varphi_2 = \arctg \frac{1 - K_1(1 + K_c)}{d_k}.$$

При  $\psi = \frac{\pi}{2}$  имеем

$$I_3'(t) = \frac{\sqrt{d_k^2 + [1 - K_1(1 + K_c)]^2}}{1 - K_c K_1} \cdot \cos(\omega t + \varphi_2); \quad (3)$$

$$I_k''(t) = -\frac{K_1 [K_1 K_c + K_n(1 - K_1 K_c)]}{(1 - K_1 K_c) \sqrt{K_1 K_c}} \sin \omega_n t \cdot e^{-\delta t}; \quad (4)$$

$$I_c''(t) = \frac{2}{3} \frac{\omega_c}{\omega} \cdot \sin \omega_c t \cdot e^{-\delta_c t}. \quad (5)$$

При  $\psi = \frac{\pi}{2}$  имеем

$$I_3'(t) = \frac{\sqrt{d_k^2 + [1 - K_1(1 + K_c)]^2}}{1 - K_1 K_c} \cdot \sin(\omega t + \varphi_2); \quad (6)$$

$$I_k''(t) = \frac{K_1}{1 - K_1 K_c} \left[ \cos \omega_n t - \frac{d_k + 2K_n(1 - K_1 K_c)}{2\sqrt{K_1 K_c}} \cdot \sin \omega_n t \right] \cdot e^{-\delta t}; \quad (7)$$

$$I_c''(t) = -\frac{2}{3} \cos \omega_c t \cdot e^{-\delta_c t}. \quad (8)$$

На рис. 2 показаны кривые, построенные по выражениям (3)—(8). При этом приняты следующие значения коэффициентов:  $K_1 = 1,0$ ;

$$K_c = 0,0278; \quad K_n = 0,03; \quad d_k = 0,02.$$

Рассмотрим влияние конденсатора  $C_1$  на гашение дуги согласно существующих теорий по данному вопросу.

Наибольший вклад в разработку теории дуговых замыканий на землю внес Петерсен. Среди других авторов, которые сделали дальнейший шаг в ее развитии, являются Петерс и Слепян. В результате были выдвинуты две основные теории, которые отличаются в своих предположениях относительно момента погасания дуги [2].

Согласно первой теории (Петерсен) дуга гаснет при прохождении через нуль тока среднечастотных колебаний  $J_c''(t)$ . Для этого ток  $J_c''(t)$  должен быть определяющим в полном токе замыкания на землю.

Вторая теория (Петерс и Слепян) предполагает возможность угасания дуги лишь при прохождении через нуль тока промышленной частоты, то есть после затухания тока  $J_c(t)$ .

Мы считаем, что в случае заземления дугогасящей катушки через конденсатор согласно второй теории дуга может погаснуть при прохождении через нуль тока низкочастотных колебаний.

Дадим сравнительную оценку возможности угасания дуги в связи с изменением переходного процесса в месте замыкания на землю. Большинство исследователей сходятся на том, что возможны оба механизма гашения дуги [3]. Последуем их примеру, полагая вероятным замыкание при любой начальной фазе  $\Psi$ . Для этого воспользуемся кривыми, приведенными на рис. 2, где показана также примерная зависимость свободной составляющей емкостного тока  $J_c''(t)$ .

При  $\Psi = \frac{\pi}{2}$  (рис. 2, а) имеем значительную по величине составляющую тока  $J_c(t)$ , которая в несколько раз превышает емкостный ток установившегося режима, принятый нами за 1. При этом амплитуда тока  $J_k''(t)$  в несколько раз меньше 1. По первой теории дуга может погаснуть в пределах четверти периода промышленной частоты, то есть при  $t < 0,005$  сек. По второй теории она погаснет лишь через полпериода низкочастотных колебаний, то есть при  $t \approx 0,06$  сек. Заметим, что до включения  $C_1$  при  $\Psi = \frac{\pi}{2}$  в переходном режиме свободная со-

ставляющая была представлена только током  $J_c''(t)$ , следовательно, по второй теории дуга могла погаснуть при  $t \approx 0,01$  сек.

При  $\Psi = 0$  (рис. 2, б) амплитуда тока  $J_c''(t)$  не превышает  $2/3$ , а амплитуда тока  $J_k''(t)$  примерно равна 1. За время существования колебаний средней частоты полный ток через нулевое значение не проходит, поэтому вероятность обрыва дуги по первой теории отсутствует. Дуга может погаснуть лишь при прохождении через нуль тока низкочастотных колебаний  $J_k''(t)$ , то есть при  $t \approx 0,025$  сек. Характерно, что до включения конденсатора  $C_1$  при  $\Psi = 0$  она могла погаснуть лишь после затухания аperiodической составляющей тока дугогасящей катушки (кривая  $e^{-d_k \omega t} \sim$ ). Очевидно, что и при других значениях  $d_k$  кривая  $J_k''(t)$  пройдет через нуль значительно раньше, чем затухнет кривая  $e^{-d_k \omega t}$ .

Следовательно, согласно первой теории после включения конденсатора  $C_1$  условия гашения дуги практически не изменились. Согласно второй теории момент времени вероятного обрыва дуги зависит от на-

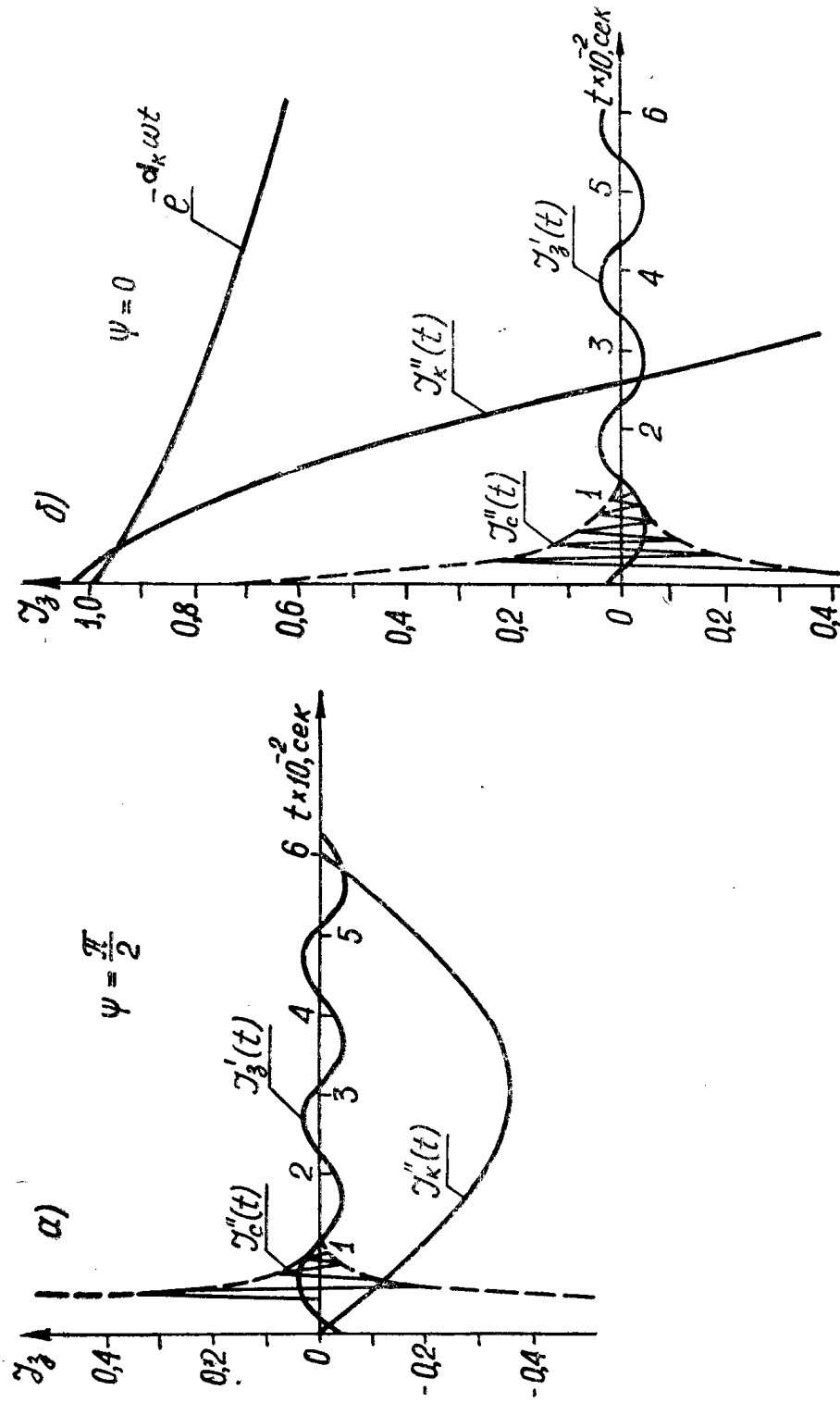


Рис. 2. Составляющие тока замыкания на землю для различных значений начальной фазы: а — при  $\psi = \frac{\pi}{2}$ ; б — при  $\psi = 0$

чальной фазы  $\Psi$ . При  $\Psi$ , близких к  $\pm \frac{\pi}{2}$ , когда свободная составляющая тока дугогасящей катушки невелика, после включения конденсатора  $C_1$  время горения дуги возрастает. Однако при  $\Psi$ , близких к нулю или  $2\pi$ , когда свободный ток катушки примерно равен 1, после включения конденсатора  $C_1$  время горения дуги до первого перехода тока через нуль резко сокращается, поэтому условия гашения дуги становятся благоприятнее, чем до включения  $C_1$ .

При определении восстанавливающегося напряжения  $\dot{U}_d$  на дуговом промежутке воспользуемся методикой, изложенной в работе [4]. Упрощенная схема замещения показана на рис. 1, в.

Конденсатор  $C_1$  и дугогасящая катушка на выравнивание зарядов емкостей неповрежденной и поврежденной фаз практически не влияют, поэтому контур среднечастотных колебаний не рассматриваем.

После затухания колебаний средней частоты емкости всех трех фаз начинают разряжаться через индуктивность  $L_k$  (рис. 1, в). Этот процесс является затухающим и протекает с круговой частотой свободных колебаний

$$\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}, \quad (9)$$

где

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_k C_3}}, \quad (10)$$

$$C_3 = \frac{C_1 \cdot 3C_r}{C_1 + 3C_r} = \frac{3C_r}{1 + K_c}, \quad (11)$$

откуда видно, что изменение емкости колебательного контура в  $\frac{1}{1+K_c}$  раз приведет к изменению  $\omega'$  примерно в отношении  $\sqrt{1+K_c}$ . Так, например, даже при весьма значительном коэффициенте  $K_c = 0,04$ ,  $\omega'$  увеличится не более чем в 1,02 раза.

Известно, что после обрыва дуги составляющая напряжения свободных колебаний и фазное напряжение находятся в противофазе. В связи с тем, что  $\omega'$  близка  $\omega$ , напряжение на дуговом промежутке  $U_d$  растет медленно и имеет характер биений.

Включение конденсатора  $C_1$  привело к незначительному увеличению  $\omega'$ , поэтому скорость восстановления напряжения на дуговом промежутке практически не изменится.

### Выводы

С точки зрения существующих теорий по вопросу гашения дуги включение конденсатора в цепь дугогасящей катушки допустимо. Более того, при замыканиях, сопровождающихся значительной по величине свободной составляющей тока катушки, условия гашения дуги при наличии конденсатора будут благоприятнее, чем до его включения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. М. Н. Райк. Защита от замыканий на землю блоков генератор-трансформатор. Энергетика за рубежом, серия релейная «защита», вып. 3. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
2. Р. Вильгейм, М. Уотерс. Заземление нейтрали в высоковольтных системах. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.
3. А. И. Долгинов. Техника высоких напряжений в электроэнергетике. М., «Энергия», 1968.
4. П. В. Борисоглебский, Л. Ф. Дмховская и др. под общей редакцией Д. В. Разевига. Техника высоких напряжений. М.—Л., «Энергия», 1964.