

С.С. АРУТЮНЯН, А.С. АРУТЮНЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ АГРЕГАТА ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА ПО КОМБИНИРОВАННОЙ СХЕМЕ ВЫПРЯМЛЕНИЯ С ТОКООГРАНИЧИВАЮЩИМ РЕАКТОРОМ И РАЗРЯДНОЙ ЦЕПЬЮ

Рассматриваются переходные процессы тягового агрегата в период внешних коротких замыканий при наличии токоограничивающего реактора и разрядной цепи.

Ключевые слова: тиристорный агрегат, короткое замыкание, переходный процесс, токоограничивающий реактор, разрядная цепь.

В [1] был рассмотрен переходный процесс при внезапном глухом внешнем коротком замыкании (к.з.) нового тягового тиристорного агрегата с комбинированной электрической схемой без токоограничивающего реактора и разрядной цепи. Как было показано, ток к.з. при такой конфигурации схемы спадает до нуля в пределах двух временных интервалов.

С целью снижения амплитуды ударного тока к.з. и обеспечения запаса силовых вентилей по току иногда необходимо включать в аварийную цепь токоограничивающий реактор L_d-R_d . При этом перенапряжения на запираемых тиристорах при отсечке тока к.з. могут достичь недопустимых уровней [2, 3]. Для их снятия путем гашения электромагнитной энергии реактора непосредственно на выходных шинах комбинированного выпрямителя дополнительно вводится разрядная цепь VD_p-R_p (рис. 1).

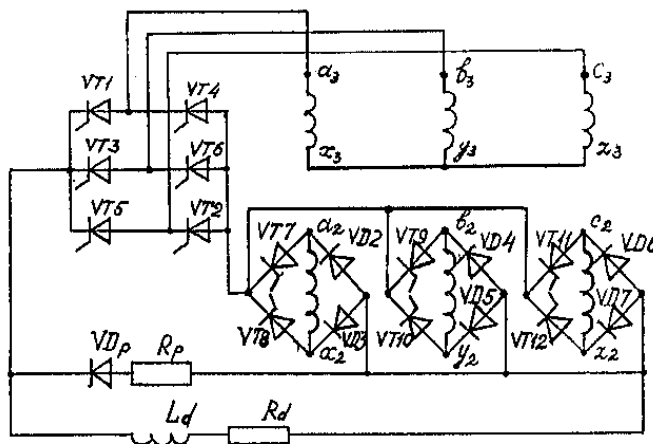


Рис. 1. Схема агрегата в режиме внезапного внешнего к.з. при токоограничивающем реакторе (L_d , R_d) и разрядной цепи (R_p , VD_p)

Выражения для определения аварийного тока в пределах первых двух временных интервалов приведены в [1]. Однако при реакторе и разрядной цепи второй интервал завершается в момент достижения тока к.з. i_{d2}^* максимального значения. Именно с этого момента включается в работу также разрядная цепь. Весь процесс спадания токов во всех трех ветвях цепи завершается в конце четвертого интервала.

Третий интервал (будет иметь место только в выпрямителе с разрядной цепью). В этом интервале справедлива система уравнений

$$u_{b3} - u_{c3} = 2L_{k3}(di_{b3}/dt) + 2R_{k3}i_{b3} - R_p i_p, \quad (1)$$

$$-E_d = L_d(di_{d3}/dt) + 2R_d i_{d3} + R_p i_p, \quad (2)$$

$$i_{d3} = i_{b3} + i_p, \quad (3)$$

где i_{d3} - ток нагрузки; i_p - ток в разрядной цепи; i_{b3} - ток в цепи “VD16, VT17 и VT2 – обмотки b3 и c3 – VT3”.

Из (1) – (3) получаем

$$d^2 i_{b3}^*/d(\omega t)^2 + (\rho_{d3} + \rho_{b3})di_{b3}^*/d\omega t + (\rho_{d3}\rho_{b3} - \rho_{p3}\rho_{pk3})i_{b3}^* = A_{b3} \sin(\omega t + \pi/3 + \theta_{k3}), \quad (4)$$

где $\rho_{d3} = (R_d + R_p) / \omega L_d$; $\rho_{p3} = R_p / \omega L_d$; $\rho_{k3} = R_p / 2\omega L_{k3}$;
 $\rho_{b3} = (2R_{k3} + R_p) / 2\omega L_{k3}$; $A_{b3} = (\sqrt{3}/2)\sqrt{\rho_{k3}^2 + 1}\sqrt{\rho_{d3}^2 + 1}$;
 $\text{tg}\theta_{b3} = 1/\rho_{d3}$.

Решая (4) для i_{b3}^* , получим

$$i_{b3}^* = -I_{Mb3}^* \sin(\omega t + \pi/3 + \theta_{b3} + \varphi_{b3}) + \frac{-P_2 I_{eb3}^* + (dI_{eb3}^*/d\omega t)}{P_1 - P_2} e^{P_1(\omega t - \psi_3)} + \frac{P_1 I_{eb3}^* - (dI_{eb3}^*/d\omega t)}{P_1 - P_2} e^{P_2(\omega t - \psi_3)}, \quad (5)$$

где P_1 и P_2 - корни характеристического уравнения

$$P^2 + (\rho_{d3} + \rho_{b3})P + (\rho_{d3}\rho_{b3} - \rho_{p3}\rho_{pk3}) = 0,$$

равные

$$P_{1,2} = -(\rho_{d3} + \rho_{b3})/2 \pm \sqrt{((\rho_{d3} - \rho_{b3})/2)^2 + \rho_{p3}\rho_{pk3}},$$

$$I_{Mb3}^* = A_{b3} / \sqrt{(1 + \rho_{p3}\rho_{pk3} - \rho_{d3}\rho_{b3})^2 + (\rho_{d3} + \rho_{b3})^2},$$

$$I_{eb3}^* = I_{b3}^* + I_{Mb3}^* \sin(\psi_3 + \pi/3 + \theta_{b3} + \varphi_{b3}),$$

$$\text{tg}\varphi_{b3} = (\rho_{d3} + \rho_{b3})/(1 + \rho_{p3}\rho_{pk3} - \rho_{d3}\rho_{b3}),$$

$$dI_{e,b3}^*/d\omega t = dI_{b3}^*/d\omega t + I_{Mb3}^* \cos(\psi_3 + \pi/3 + \theta_{b3} + \varphi_{b3}); \quad (6)$$

I_{eb3}^* и $dI_{eb3}^*/d\omega t$ - начальное значение тока i_{b3}^* и его производная, определяемые по (8) [1] и (1) при $\omega t = \psi_3$.

Третий интервал заканчивается, когда i_{b3}^* принимает нулевое значение. При выборе элементов разрядной цепи необходимо знать максимальное значение тока в ней. Уравнение относительно тока i_p^* можно получить из исходных (1) – (3). Для этого определим разность (2) и (3) и исключим из нее токи i_{d3} и i_{b3} и их производные с помощью (1) и (3). После преобразования относительно тока i_p^* разрядной цепи получаем

$$\begin{aligned} d^2 i_p^* / d(\omega t)^2 + (\rho_{d3} + \rho_{b3}) di_p^* / d\omega t + (\rho_{d3}\rho_{b3} - \rho_{p3}\rho_{pk3}) i_p^* = \\ = A_p \sin(\omega t + \pi/3 + \theta_p), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\rho_3 = 2R_{k3} / \omega L_d$, $A_p = -(\sqrt{3}/2)\sqrt{\rho_2^2 + 1}\sqrt{\rho_{k3}^2 + 1}$, $\text{tg}\theta_p = 1/\rho_2$.

Решение (7) имеет вид

$$\begin{aligned} i_p^* = I_{op}^* - I_{op}^* \sin(\omega t + \pi/3 + \theta_p + \varphi_p) + \\ + \frac{-P_2 I_{ep}^* + dI_{ep}^*/d\omega t}{P_1 - P_2} e^{P_1(\omega t - \psi_3)} + \frac{P_1 I_{ep}^* - dI_{ep}^*/d\omega t}{P_1 - P_2} e^{P_2(\omega t - \psi_3)}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $I_{op}^* = \beta_p / (\rho_{d3}\rho_{b3} - \rho_{p3}\rho_{pk3})$,

$$I_{Mp}^* = A_p / \sqrt{(1 + \rho_{p3}\rho_{pk3} - \rho_{d3}\rho_{b3})^2 + (\rho_{d3} + \rho_{b3})^2},$$

$$I_{ep}^* = I_{b3}^* + I_{Mp}^* \sin(\psi_3 + \pi/3 + \theta_p + \varphi_p) - I_{op}^*,$$

$$dI_{ep}^* / d\omega t = I_{Mp}^* \cos(\psi_3 + \pi/3 + \theta_p + \varphi_p),$$

$$\text{tg}\varphi_p = \text{tg}\varphi_{b3} = (\rho_{d3} + \rho_{b3}) / (1 + \rho_{b3}\rho_{pk3} - \rho_{d3}\rho_{b3}).$$

Ток в цепи нагрузки i_{d3}^* можно найти либо по (3) в относительных единицах и представляя i_{b3}^* и i_p^* по (5) и (8), либо решением уравнения относительно тока i_{d3}^* , полученного из исходной системы (1) – (3):

$$\begin{aligned} d^2 i_{d3}^* / d(\omega t)^2 + (\rho_{d3} + \rho_{b3}) di_{d3}^* / d\omega t + (\rho_{d3}\rho_{b3} - \rho_{p3}\rho_{pk3}) i_{d3}^* = \\ = A_{d3} \sin(\omega t + \pi/3), \end{aligned} \quad (9)$$

где $A_{d3} = (\sqrt{3}/2)\rho_{p3}\sqrt{\rho_{k3}^2 + 1}$.

Решением уравнения (9) является

$$\begin{aligned} i_{d3}^* = -I_{Md3}^* \sin(\omega t + \pi/3 + \varphi_{d3}) + \\ + \frac{-P_2 I_{ed3}^* + dI_{ed3}^*/d\omega t}{P_1 - P_2} e^{P_1(\omega t - \psi_3)} + \frac{P_1 I_{ed3}^* - dI_{ed3}^*/d\omega t}{P_1 - P_2} e^{P_2(\omega t - \psi_3)}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $I_{Md3}^* = A_{d3} / \sqrt{(1 + \rho_{p3}\rho_{pk3} - \rho_{d3}\rho_{b3})^2 + (\rho_{d3} + \rho_{b3})^2}$,

$$I_{ed3}^* = I_{d3}^* + I_{Md3}^* \sin(\psi_3 + \pi/3 + \varphi_{d3}),$$

$$dI_{cd3}^*/d\omega t = dI_{d3}^*/d\omega t + I_{Md3}^* \cos(\psi_3 + \pi/3 + \varphi_{d3}),$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{d3} = \operatorname{tg} \varphi_{b3} = \operatorname{tg} \varphi_p;$$

I_{d3}^* – начальное значение тока i_{d3}^* , причем $I_{d3}^* = I_{b3}^*$, а его производная $dI_{d3}^*/d\omega t$ в соответствии с (2) при $\omega t = \psi_3$ оказывается равной $dI_{d3}^*/d\omega t = -\rho_2 I_{d3}^*$.

Третий интервал заканчивается, когда $i_{b3}^* (0$. Этому значению тока соответствует начало четвертого интервала, когда $\omega t = \psi_4$.

Четвертый интервал (завершающий). Ток проводит контур "нагрузка – разрядная цепь". В этом контуре процесс описывается уравнением

$$L_d(di_{d4}/dt) + (R_d + R_p)i_{d4} = 0, \quad (11)$$

которое после преобразований имеет вид

$$di_{d4}^*/d\omega t + \rho_{d4}i_{d4}^* = 0, \text{ причем } \rho_{d4} = (R_d + R_p)/\omega L_d = \rho_{d3}.$$

Решением этого уравнения является

$$i_{d4}^* = I_{cd4}^* e^{-\rho_{d4}(\omega t - \psi_4)}, \quad (12)$$

где $I_{cd4}^* = I_4^*$; I_4^* – начальное значение тока i_{d4}^* , определяемое по (12) при $\omega t = \psi_4$.

На рис. 2 приведены кривые тока к.з. комбинированного выпрямителя при наличии (кривая 1) и отсутствии (кривая 2) реактора индуктивностью $L_d = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$ для случая отсутствия разрядной цепи и при ее наличии (кривая 3). Там же показаны вспомогательные кривые 4, 5 и 6, необходимые для определения границ между интервалами (ψ_2 и ψ_3). Расчеты выполнены в относительных единицах для следующих данных: $U_2 = 220 \text{ В}$; $U_3 = 127 \text{ В}$; $\omega = 314$; $L_{k2} = 0,6 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$; $R_{k2} = 0,46 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$; $L_{k3} = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$; $R_{k3} = 0,38 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$; $L_d = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$; $R_d = 0,1 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$; $R_{раз} = 0,15 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$.

Как видно из рис.2, применение разрядной цепи не влияет на амплитуду тока, не вызывает его ускоренного гашения в вентилях выпрямителей (кривая i_{b3}^*), однако приводит к значительной длительности гашения тока в контуре. Поэтому, если расчеты показывают, что отсутствие разрядной цепи не мешает нормальному гашению тока, то применять его не следует. По результатам машинной обработки данных построены кривые тока в контурах. Данные экспериментальных исследований макетного образца подтвердили полученные теоретические выводы.

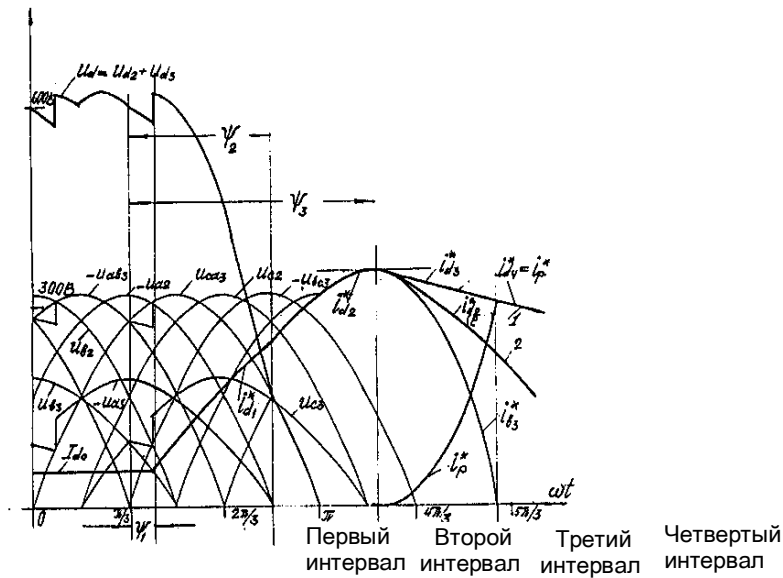


Рис. 2. Диаграммы напряжений и токов к.з. выпрямителя с токоограничивающим реактором (L_d, R_d): 1 - i_d^* ($i_{d1}^*, i_{d2}^*, i_{d3}^*$ и i_{d4}^*) при наличии разрядной цепи (R_p, VD_p);
2 - i_d^* (i_{d1}^*, i_{d2}^* и $i_{d2(p)}^*$) при отсутствии разрядной цепи

Общие результаты проведенного исследования динамических режимов комбинированного преобразовательного агрегата сводятся к следующим положениям:

- приведенные формулы позволяют рассчитать аварийный режим к.з. агрегата и выбрать параметры его элементов – трансформатора, вентиля, реактора и разрядной цепи;
- включение на выходе агрегата токоограничивающего реактора с небольшой индуктивностью $L_d = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$ позволяет ограничить запас у вентиля по току примерно двукратным значением, требуемым по условиям нормальной работы, и обеспечить надежную защиту агрегата;
- шунтирование токоограничивающего реактора разрядной цепью, содержащей полупроводниковый диод и резистор, снижает время существования тока к.з., однако в эту цепь, с целью ограничения тока, через диод требуется вводить резистор со значительным сопротивлением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Арутюнян С.С.** Новый тиристорный агрегат для электрического пассажирского транспорта // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2000. – Т.53, ¹ 1. – С. 72-77.
2. **Лабунцов В.А.** Энергетическая электроника.-М.: Энергоатомиздат, 1987.-463 с.
3. **Беркович Е.И.** и др. Полупроводниковые выпрямители. - М.: Энергия, 1978.- 448 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 20.04.1999.

Ս.Ս. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Հ.Ս. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

**ՈՒՂՂՄԱՆ ՀԱՄԱԿՑՎԱԾ ՍԽԵՄԱՅՈՎ ԷԼԵԿՏՐԱՏՐԱՆՍՊՈՐՏԻ
ԱԳՐԵԳԱՏԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ՀՈՍԱՆՔԱՄԱՀՄԱՆԱՓԱԿԻՉ
ՌԵԱԿՏՈՐԻ ԵՎ ՊԱՐՊԻՉ ՇՂԹԱՅԻ ԱՌԿԱՅՈՒԹՅԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ**

Քննարկվում են քարշի ագրեգատի անցողիկ պրոցեսները արտաքին կարճ միակցումների ժամանակ հոսանքասահմանափակիչ ռեակտորի և լիցքաթափման շղթայի առկայության դեպքում:

S.S. HARUTYUNYAN, H.S. HARUTYUNYAN

**RESEARCH OF ELECTRICAL TRANSPORT UNIT BY THE COMBINED
RECTIFIER SCHEME IN THE PRESENCE OF
CURRENT-LIMITING REACTOR AND DISCHARGE CIRCUIT**

Examination of traction unit transients in time of external short-circuits in the presence of current-limiting reactor and discharge circuit is considered.