

С.С. АРУТЮНЯН

ТИРИСТОРНЫЙ АГРЕГАТ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА

Կատարված է էլեկտրատրանսպորտի քարշի ագրեգատի թիրիստորային ուղղիչի ուսումնասիրություն կ.մ. ռեժիմում, որը հաստատում է վերջինիս կազմում ավելի ցածր լարման ուժային թիրիստորների օգտագործման հնարավորությունն ու հպման ցանցի սնումը բարելավված հարմունիկ կազմով ուղղված լարումով:

Проведено исследование тиристорного выпрямителя в составе тягового агрегата электрического транспорта в режиме к.з., подтверждающее возможность использования в нем силовых тириستоров на меньшие напряжения и питания контактной сети выпрямленным напряжением улучшенного гармонического состава.

Ил.4. Библиогр.: 2 назв.

A thyristor rectifier in traction unit of the electric transport is studied in short circuit conditions confirming the possibilities of power thyristor use in lesser voltages and supply contact network with rectified voltage of improved harmonic contents.

Ил 4. Ref.2.

В условиях эксплуатации городского и пригородного электрического транспорта для питания контактных сетей используется постоянный ток напряжением 600 В. Источниками электроэнергии служат тяговые преобразовательные агрегаты (схема Кюблера) [1, 2].

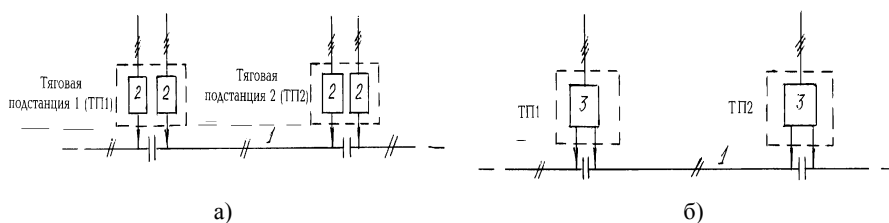


Рис. 1. Двухстороннее питание одной секции контактной сети:

а) от двухагрегатных подстанций; б) от одноагрегатных подстанций;

1 - секция контактной сети; 2 - однофидерный агрегат; 3 - двухфидерный агрегат

С целью поддержания уровня напряжения при значительной протяженности контактных сетей применяется система децентрализованного электроснабжения, при которой тяговые агрегаты распределяются вдоль сети. Наиболее перспективными являются схемы двухстороннего питания секций контактной сети, однако до последнего времени для их обеспечения приходится ориентироваться на двухагрегатные тяговые подстанции (ТП) (рис. 1а), т.к. более рациональные и экономичные двухфидерные

агрегаты (рис.16) промышленностью не изготавливаются. Тяговый агрегат со схемой выпрямления Кюблера имеет два существенных недостатка: высокое обратное напряжение на вентиле (1260 В) и большую амплитуду пульсаций (5,6% U_d).

В ГИУА разработан тяговый тиристорный агрегат, предназначенный для работы в условиях децентрализованного электроснабжения. В нем использована комбинированная схема выпрямления, обеспечивающая высокое качество выпрямленного напряжения и возможность питания двух электрически независимых плеч (фидеров) тяговой сети. Комбинированный трехфазный 12-пульсный выпрямитель питается от трансформатора с тремя вторичными обмотками.

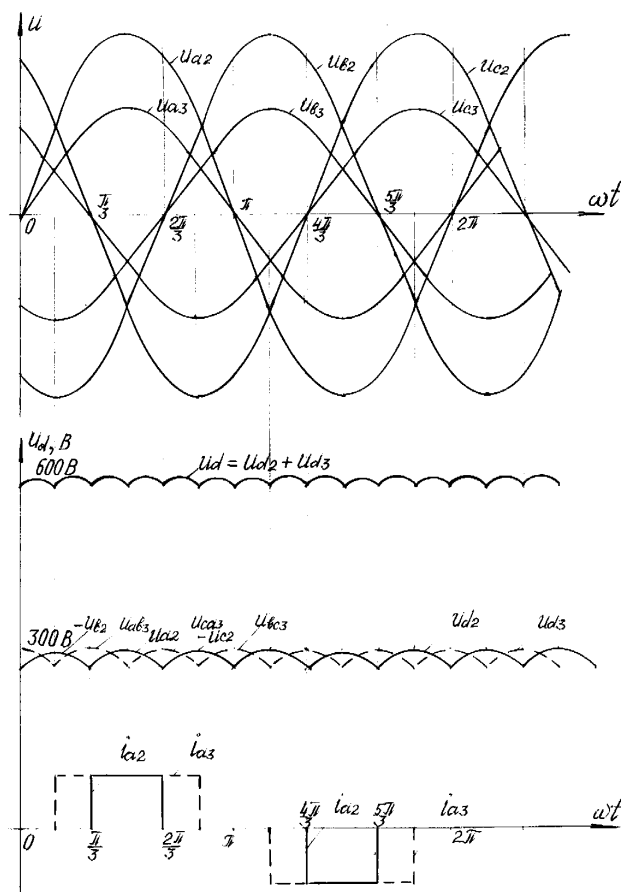


Рис.2. Диаграммы напряжений и токов трехфазного 12-пульсного комбинированного выпрямителя

Как видно из временных диаграмм напряжений и токов (рис.2), все три выпрямителя имеют на выходе равные (в среднем) выпрямленные напряжения u_{d2} , u_{d3} и u_{d4} , каждое из которых имеет 6 пульсаций. При этом напряжения u_{d2} и u_{d3} , u_{d2} и u_{d4} сдвинуты по фазе на $\pi/6$. Это обеспечивает удвоение амплитуды результирующего выпрямленного напряжения и числа пульсаций.

Основные соотношения рассматриваемого комбинированного выпрямителя:

1. Номинальное выпрямленное напряжение U_d - 600 В.
2. Номинальный выпрямленный ток I_d : агрегата в целом - 2000 А; каждого фидера - 1000 А.
3. Число пульсаций - 12.
4. Обратное напряжение на вентиле - 320 В.
5. Питающий трансформатор: мощность $S_{тр}$, кВА; напряжение первичное U_1 - 10 кВ; напряжение вторичное U_2 - 220 В; напряжение третичное U_3 - 127 В; напряжение четвертичное U_4 - 127 В.
6. Защита агрегата от внешних к.з. - снятие с тиристоров коротких замыканий управляющих импульсов.
7. Токоограничение в аварийных режимах - реактор индуктивностью до 0,5 мГн.

Преимуществами этого выпрямителя являются: снижение обратного напряжения вентилях одного плеча, высокое качество выпрямленного напряжения, объединение в одном агрегате двух преобразовательных комплектов. Основными элементами силовой цепи преобразователя являются полупроводниковые силовые вентили (тиристоры и диоды). При этом решающими факторами, влияющими на выбор количества вентилях, являются максимальные обратные напряжения на них и токи, возникающие при близком внешнем к.з. агрегата.

В [1] приводится инженерный метод расчета. Более точные результаты получаются при расчете по классическому методу [2]. В настоящей работе рассматривается переходный процесс для исследуемого комбинированного выпрямителя (рис.3), в котором трехфазный мост имеет симметричное управление, а однофазные мосты с целью упрощения системы управления - несимметричные. Для более быстрой ликвидации аварийного тока в комбинированном выпрямителе может быть предусмотрена разрядная цепь с диодом VD1 и резистором R. Данный процесс рассматривается без учета разрядной цепи. При этом принимается, что к.з. возникло в наиболее неблагоприятный момент - сразу после окончания коммутации в трехфазном мостовом выпрямителе.

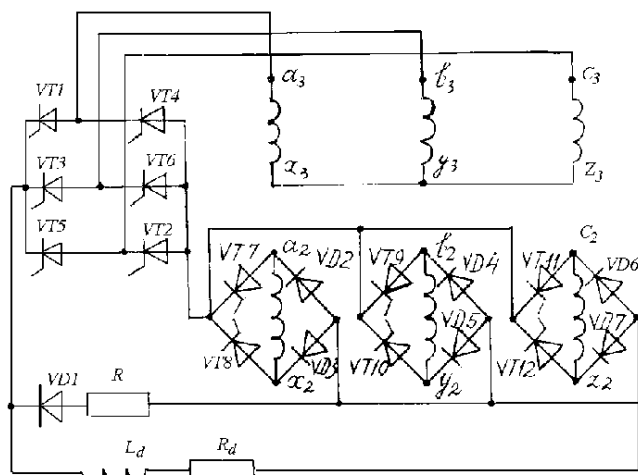


Рис. 3. Схема агрегата в режиме внезапного внешнего глухого к.з. при токоограничивающем реакторе (L_d , R_d) и разрядной цепи (R , VD1)

При расчетах приняты следующие допущения:

- все индуктивные и активные сопротивления схемы замещения линейны;
- активные сопротивления вентилях ничтожно малы и не учитываются.

Предполагается, что ток непосредственно в начале аварии протекал по цепи: VD18-обмотка с2 - VT17 и VT2-обмотки с3 и b3 - VT3 - L_d , R_d .

Процесс состоит из двух интервалов. Начальный ток второго интервала определяется конечным током первого интервала.

Фазные напряжения сети на входах трехфазного и однофазных мостов комбинированного выпрямителя заданы формулами:

$$\begin{aligned} u_{a3} &= \sqrt{2}U_3 \sin(\omega t + 5\pi / 6), & u_{b3} &= \sqrt{2}U_3 \sin(\omega t + \pi / 6), \\ u_{c3} &= \sqrt{2}U_3 \sin(\omega t - \pi / 2), & u_{a2} &= \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t + 5\pi / 6), \\ u_{b2} &= \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t + \pi / 6), & u_{c2} &= \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t - \pi / 2), \end{aligned}$$

причем $U_2 = \sqrt{3}U_3$.

При этом в отдельные плечи включены одиночные вентили (тиристоры и диоды).

Первый интервал (внекоммутационный). Ток замыкается по цепи: VD5-обмотка с2-VT12 и VT6- обмотки с3 и b3 - VT2 - $L_{d'}$, $R_{d'}$.

В этом интервале справедливо уравнение

$$u_{b3} - u_{c3} - u_{c2} = (L_d + 2L_{k3} + L_{k2}) \frac{di_{d1}}{dt} + (R_d + 2R_{k3} + R_{k2}) i_{d1}, \quad (1)$$

в котором индекс “2” относится ко вторичным обмоткам, индекс “3” - к третичным.

Приводя это уравнение к классическому виду и переходя к относительным единицам с помощью формулы $i_d^* = z_{k3} i_d / \sqrt{2}U_3$, а также принимая в качестве базовой третичную обмотку, получим

$$di_{d1}^* / d\omega t + \rho_{d1} i_{d1}^* = A_{d1} \sin(\omega t + 5\pi / 12), \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \rho_{d1} &= \frac{R_{d1} + 2R_{k3} + R_{k2}}{\omega L_d + 2\omega L_{k3} + \omega L_{k2}}, & A_{d1} &= 1,67 \sqrt{\frac{\rho_{k3}^2 + 1}{1 + \sigma_{d1}}}, \\ \rho_{k3} &= \frac{R_{k3}}{\omega L_{k3}}, & \sigma_{d1} &= \frac{L_d + L_{k2}}{2L_{k3}}. \end{aligned}$$

Решением (2) будет

$$i_{d1}^* = I_{Md1}^* \sin(\omega t + 5\pi / 12 + \varphi_{d1}) + I_{ed1}^* e^{-\rho_{k3}(\omega t - \psi_1)}, \quad (3)$$

где

$$\operatorname{tg} \varphi_{d1} = -1 / \rho_{d1}, \quad I_{Md1}^* = \frac{A_{d1}}{\sqrt{\rho_{d1}^2 + 1}} = 1,67 \frac{\sqrt{\rho_{k3}^2 + 1}}{(1 + \sigma_{d1}) \sqrt{\rho_{d1}^2 + 1}},$$

$$I_{ed1}^* = I_{d1}^* - I_{Md1}^* \sin(\psi_1 + 5\pi/12 + \varphi_d), \quad I_{d1}^* = \frac{\omega L_{k3} I_{d1}}{\sqrt{2} U_3} \sqrt{\rho_{k3}^2 + 1} - \text{начальное значение тока}$$

i_{d1}^* при $\omega t = \psi_1 \cong 15^\circ$.

Первый интервал заканчивается в момент, когда должна начаться коммутация в однофазном мостовом выпрямителе фазы с2, когда ток переходит с VD5 на VD6 (VT11 проводить ток не будет, т.к. с него снят управляющий импульс) и в дальнейшем проходит через VD6 и VD12, минуя обмотку с2.

Начало коммутации соответствует условию

$$-u_{c2} = L_{k2} \frac{di_{d1}}{dt} + R_{k2} i_{d1} \quad (4)$$

или

$$\begin{aligned} \frac{di_{d1}^*}{d\omega t} + \rho_1 i_{d1}^* &= \sqrt{\rho_{d1}^2 + 1} I_{Md1}^* \sin(\omega t + 5\pi/12 + \varphi_{d1} + \varphi_1) + \\ &+ (\rho_1 - \rho_{d1}) I_{ed1}^* e^{-\rho_{d1}(\omega t - \psi_1)} + \rho_1 I_{od1}^*, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\rho_1 = R_{k2} / \omega L_{k2}$, $\text{tg} \varphi_1 = 1 / \rho_1$, $\sigma_1 = L_{k2} / L_{k3}$, $A_1 = U_2 \sqrt{\rho_{k3}^2 + 1} / U_3 \sigma_1 = \sqrt{3} \sqrt{\rho_{k3}^2 + 1} / \sigma_1$.

Угол ψ_2 определяется по (5) либо аналитически, либо путем построения кривых $A_1 \cos \omega t = f_1(\omega t)$ и $(di_{d1}^* / d\omega t) + \rho_1 i_{d1}^* = f_2(\omega t)$ и нахождения точки их пересечения.

Второй интервал. Ток замыкается по цепи: VD6, VT12 и VT6 - обмотки b3 и c3 - VT2 - L_d, R_d. В этом интервале справедливо уравнение

$$u_{b3} - u_{c3} = (L_d + 2L_{k2}) \frac{di_{d2}}{dt} + (R_d + 2R_{k3}) i_{d2}. \quad (6)$$

После преобразований имеем

$$(di_{d2}^* / d\omega t) + \rho_{d2} i_{d2}^* = A_{d2} \sin(\omega t + \pi/3), \quad (7)$$

причем

$$\rho_{d2} = R_d + 2R_{k3} / (\omega L_d + 2\omega L_{k3}), \quad \sigma_{d2} = L_d / 2L_{k3}, \quad A_{d2} = \frac{\sqrt{3} \sqrt{\rho_{k3}^2 + 1}}{2(1 + \sigma_{d2})}.$$

Решением (7) является

$$i_{d2}^* = I_{Md2}^* \sin(\omega t + \pi/3 + \varphi_{d2}) + I_{ed2}^* e^{-\rho_{d2}(\omega t - \psi_2)}, \quad (8)$$

в котором

$$\begin{aligned} I_{Md2}^* &= \frac{A_{d2}}{\sqrt{\rho_{d2}^2 + 1}} = \frac{\sqrt{3} \sqrt{\rho_{k3}^2 + 1}}{2(1 + \sigma_{d2}) \sqrt{\rho_{d2}^2 + 1}}, \\ I_{ed2}^* &= I_{d2}^* - I_{Md2}^* \sin\left(\psi_2 + \frac{\pi}{3} + \varphi_{d2}\right), \end{aligned}$$

I_{d2}^* - начальное значение тока i_{d2}^* при $\omega t = \psi_2$, определяемое по (3):

$$I_{d2}^* = I_{Md1}^* \sin(\psi_2 + 5\pi/12 + \varphi_{d1}) + I_{ed1}^* e^{-\rho_{d1}(\psi_2 - \psi_1)},$$

В случае, когда на выходе выпрямителя отсутствует разрядная цепь (R, VD1) (рис.4), второй интервал заканчивается при $i_{d2}^* = 0$. Этим завершается второй интервал переходного процесса.

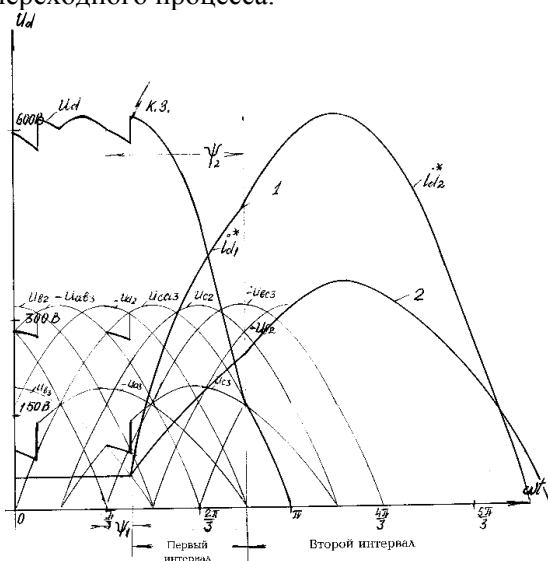


Рис. 4. Напряжения и токи к.з. выпрямителя без разрядной цепи (R, VD) при $L_d = 0$ (кривая 1) и $L_d = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$ (кривая 2)

Результаты проведенного исследования динамических режимов выпрямителя позволяют сделать следующее заключение:

1. С помощью приведенных формул можно рассчитать аварийный режим к.з. агрегата и выбрать параметры его элементов.
2. Включение на выходе агрегата токоограничивающего реактора с небольшой индуктивностью ($L_d = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$) позволяет ограничить запас у вентилей по току примерно двукратным значением, требуемым по условиям нормальной работы, и обеспечивает надежную защиту агрегата.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Энергетическая электроника:** Справочное пособие.- М.: Энергоатомиздат, 1987. – 464 с.
2. **Беркович Е.И. и др.** Полупроводниковые выпрямители.- М.: Энергия, 1978. –448с.

ГИУА

20.07.1998