

Er 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Серия А

№ 58

1954

С. Р. БУАЧИДЗЕ
КАНДИДАТ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

**ВНЕШНЯЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭКВИВАЛЕНТНОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

ENSV Teaduste Akadeemia
Keskraamatukogu

P. 18954



ЭСТОНСКОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИН 1954

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Включение в сети переменного тока промежуточного звена постоянного тока поднимает целый ряд новых проблем. Среди них важное место занимает проблема регулирования такого звена [Л. 1].

Анализ режимов работы таких установок затрудняется из-за сложности схем соединения преобразовательных подстанций звена постоянного тока.

В данной работе мы задались себе целью упростить проблему посредством замены всех агрегатов преобразовательной подстанции, соединенных по мостовой схеме¹, одним эквивалентным агрегатом, с соответствующей внешней характеристикой. Работа агрегатов рассматривается в установившихся режимах, без учета влияния высших гармоник.

Для случая параллельного соединения преобразователей мы исходим из положений, примененных И. Георгиу для определения характеристики эквивалентного регулятора скорости электрической станции [Л. 2].

Приняты следующие условные обозначения: величины переменного тока имеют снизу начерченную синусоиду, а постоянного — подчеркнуты снизу черточкой; величины выпрямительной установки имеют индекс α — символ угла зажигания выпрямителя, а инверторной — индекс β — символ угла опережения инвертора.

¹ Как известно, мостовая схема является наиболее приемлемой для передачи постоянного тока.

II РАБОТА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ НА ШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА БЕСКОНЕЧНОЙ МОЩНОСТИ

1. Параллельное соединение преобразователей (рис. 1)

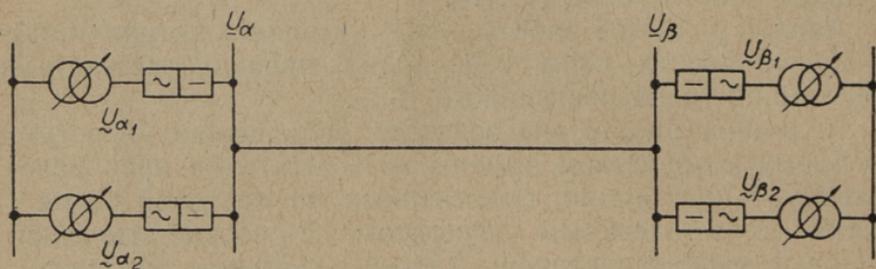


Рис. 1.

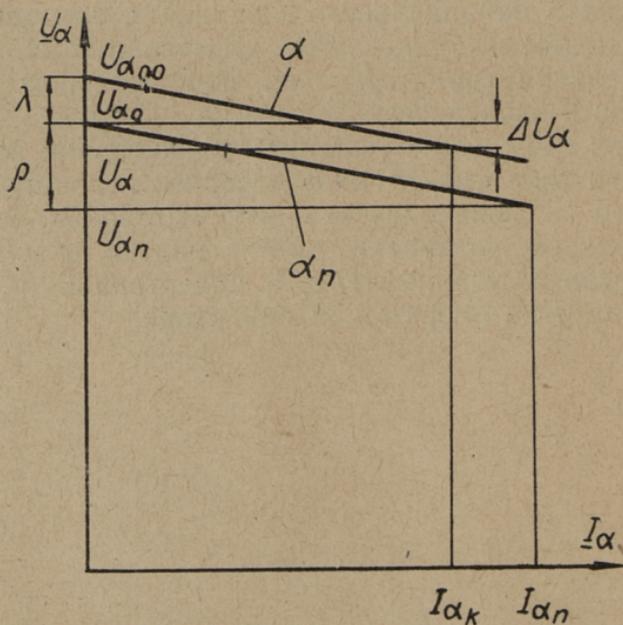


Рис. 2.

а) Эквивалентный выпрямитель

На рис. 2 представлена внешняя характеристика выпрямителя. Всякое воздействие на угол зажигания или же на напряжение переменного тока выпрямителя вызывает, как известно, смещение его характеристики параллельно самой себе.

Обозначим через:

\underline{U}_{α_0} — номинальное напряжение шин постоянного тока при холостом ходе;

\underline{U}_{α} — напряжение на шинах в какой-либо момент;

\underline{U}_{α_n} — напряжение выпрямителя при полной (номинальной) нагрузке;

Q_1, Q_2, \dots, Q_k — индуктивное падение напряжения при номинальной нагрузке;

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$ — сдвиг характеристики, вызванный воздействием на угол зажигания, или же на напряжение переменного тока \underline{U}_{α} ; сдвиги характеристик выражены в вольтах;

$\Delta \underline{U}_{\alpha} = (\underline{U}_{\alpha_0} - \underline{U}_{\alpha})$ — падение напряжения в какой-либо момент;

$\underline{I}_{\alpha_{n_1}}, \underline{I}_{\alpha_{n_2}}, \dots, \underline{I}_{\alpha_{n_k}}$ — номинальные токи выпрямителей;

$\underline{I}_{\alpha_1}, \underline{I}_{\alpha_2}, \dots, \underline{I}_{\alpha_k}$ — токи выпрямителей в какой-либо момент;

$\underline{I}_{\alpha} = \underline{I}_{\alpha_1} + \underline{I}_{\alpha_2} + \dots + \underline{I}_{\alpha_k}$ — суммарный ток выпрямительной установки.

Согласно рис. 2 получим:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{\alpha_1} &= \frac{I_{\alpha_{n_1}}}{\varrho_1} [\Delta \underline{U}_\alpha + \lambda_1], \\ \underline{I}_{\alpha_2} &= \frac{I_{\alpha_{n_2}}}{\varrho_2} [\Delta \underline{U}_\alpha + \lambda_2], \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots, \\ \underline{I}_{\alpha_k} &= \frac{I_{\alpha_{n_k}}}{\varrho_k} [\Delta \underline{U}_\alpha + \lambda_k]. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Эти формулы дают распределение тока в функции снижения напряжения на шинах. И, так как суммарный ток

$$\underline{I}_\alpha = \sum_1^k \frac{I_{\alpha_n}}{\varrho} [\Delta \underline{U}_\alpha + \lambda],$$

то получим для падения напряжения:

$$\Delta \underline{U}_\alpha = \frac{\underline{I}_\alpha - \sum_1^k \frac{I_{\alpha_n} \cdot \lambda}{\varrho}}{\sum_1^k \frac{I_{\alpha_n}}{\varrho}}.$$

Подставляя это значение в (1), получаем:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{\alpha_1} &= \frac{I_{\alpha_{n_1}}}{\varrho_1} \left[\frac{\underline{I}_\alpha - \sum_1^k \frac{I_{\alpha_n} \cdot \lambda}{\varrho}}{\sum_1^k \frac{I_{\alpha_n}}{\varrho}} + \lambda_1 \right], \\ \underline{I}_{\alpha_2} &= \frac{I_{\alpha_{n_2}}}{\varrho_2} \left[\frac{\underline{I}_\alpha - \sum_1^k \frac{I_{\alpha_n} \cdot \lambda}{\varrho}}{\sum_1^k \frac{I_{\alpha_n}}{\varrho}} + \lambda_2 \right], \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\rho' = \frac{I'_{\alpha_n}}{k \sum_1 \frac{I_{\alpha_n}}{\rho}}; \quad (4)$$

Как известно, для выпрямителя падение напряжения

$$\rho = \frac{I_{\alpha_n} X_{\alpha}}{\pi/3}, \quad (5)$$

где X_{α} — реактанс питающего трансформатора.

Сдвиг характеристики выпрямителя, согласно рис. 2:

$$\lambda = \underline{U}_{\alpha_{00}} - \underline{U}_{\alpha_0} \quad (6)$$

Напряжения холостого хода:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{\alpha_{00}} &= 2,34 \underline{U}_{\alpha_{00}} \cos \alpha_{00}; \\ \underline{U}_{\alpha_0} &= 2,34 \underline{U}_{\alpha_0} \cos \alpha_0; \end{aligned}$$

где фазовые напряжения \underline{U}_{α_0} и $\underline{U}_{\alpha_{00}}$ можно регулировать переключением анцапф трансформатора и величины $\cos \alpha_0$ и $\cos \alpha_{00}$ — изменением угла зажигания.

Подставляя значения $\underline{U}_{\alpha_{00}}$ и \underline{U}_{α_0} в (6) получим для сдвига характеристики:

$$\lambda = 2,34 (\underline{U}_{\alpha_{00}} \cos \alpha_{00} - \underline{U}_{\alpha_0} \cos \alpha_0). \quad (7)$$

Подставляя значение ρ из (5) в (3) и (4), а также значение λ из (7) в (3), получим для эквивалентного выпрямителя:

$$\lambda' = \frac{2,34 \sum_1^k \frac{1}{X_{\alpha}} (\underline{U}_{\alpha_{00}} \cos \alpha_{00} - \underline{U}_{\alpha_0} \cos \alpha_0)}{\sum_1^k \frac{1}{X_{\alpha}}}; \quad (8)$$

$$\rho' = \frac{I'_{\alpha_n}}{k \sum_1 \frac{1}{X_{\alpha}}}. \quad (9)$$

С другой стороны можно написать, что индуктивное падение напряжения эквивалентного выпрямителя

$$q' = \frac{I'_{\alpha_n} X'_\alpha}{\pi/3}. \quad (10)$$

Сопоставляя (9) и (10), получим для эквивалентного реактанса выпрямительной подстанции:

$$X'_\alpha = \frac{1}{\sum_1^k \frac{1}{X_\alpha}}. \quad (11)$$

При неизменных анцапфах трансформаторов ($U_{\alpha_{00}} = U_{\alpha_0} = C'$) и регулировании посредством изменения угла зажигания выражение (8) принимает следующий вид:

$$\lambda' = \frac{2,34 \sum_1^k \frac{U_{\alpha_0}}{X_\alpha} (\cos \alpha_{00} - \cos \alpha_0)}{\sum_1^k \frac{1}{X_\alpha}}. \quad (8')$$

При постоянном угле зажигания ($\cos \alpha_{00} = \cos \alpha_0$) и регулировании посредством переключения анцапф трансформаторов получим из (8):

$$\lambda = \frac{2,34 \sum_1^k \frac{\cos \alpha_0}{X_\alpha} (U_{\alpha_{00}} - U_{\alpha_{00}})}{\sum_1^k \frac{1}{X_\alpha}}. \quad (8'')$$

б) Эквивалентный инвертор

Внешняя характеристика инвертора представлена на рис. 3.

При неизменных анцапфах трансформаторов ($U_{\beta_{00}} = U_{\beta_0} = C'$) и регулировании посредством изменения угла опережения β выражение (12) примет следующий вид:

$$\lambda' = \frac{2,34 \sum_1^k \frac{U_{\beta_0}}{x_{\beta}} (\cos \beta_0 - \cos \beta_{00})}{\sum_1^k \frac{1}{x_{\beta}}} \quad (12')$$

При постоянном угле опережения ($\cos \beta_{00} = \cos \beta_0$) и регулировании посредством переключения анцапф трансформаторов получим из (12):

$$\lambda' = \frac{2,34 \sum_1^k \frac{\cos \beta_0}{x_{\beta}} (U_{\beta_0} - U_{\beta_{00}})}{\sum_1^k \frac{1}{x_{\beta}}} \quad (12'')$$

2. Последовательное соединение преобразователей

Для примера на рис. 4 дана схема с последовательно соединенными с одной стороны четырьмя выпрямителями и с другой — четырьмя инверторами и заземленной средней точкой на обоих концах.

Рассмотрим сначала случай, когда ток небаланса на землю отсутствует. Будем иметь для напряжения эквивалентного выпрямителя:

$$\underline{U}'_{\alpha} = \sum_1^k \underline{U}_{\alpha} = 2,34 \sum_1^k \underline{U}_{\alpha} \cos \alpha - \frac{I}{\pi/3} \sum_1^k X_{\alpha}, \quad (15)$$

где I — общий для всех вентилях ток [током утечки в линии пренебрегаем ($I_{\alpha} \approx I_{\beta} \approx I$)].

Это выражение дает вид внешней характеристики эквивалентного выпрямителя, откуда имеем для индуктивного падения напряжения

$$\varrho' = \frac{I_n}{\pi/3} \sum_1^k X_\alpha, \quad (16)$$

где I_n — номинальный ток передачи, и для эквивалентного реактанса выпрямительного агрегата

$$X'_\alpha = \sum_1^k X_\alpha. \quad (17)$$

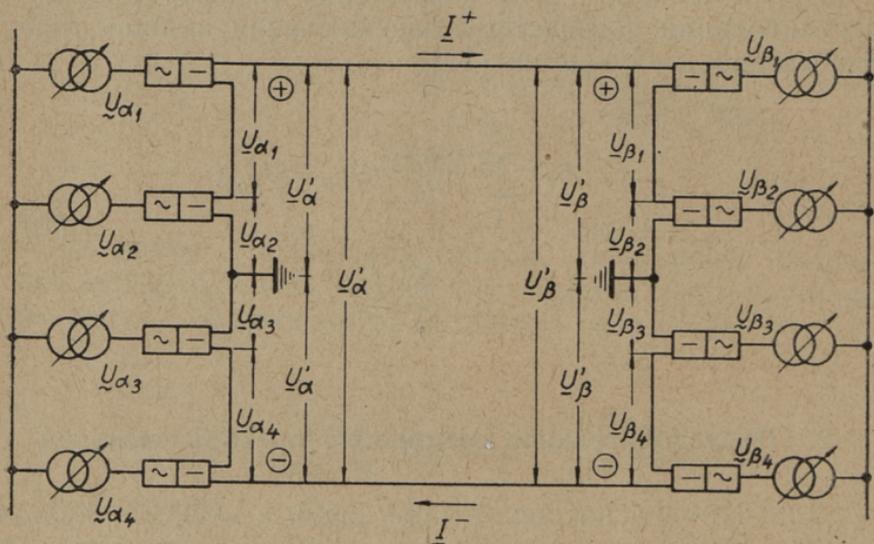


Рис. 4.

Для эквивалентного инвертора получим аналогичные выражения:

$$\underline{U}'_\beta = \sum_1^k \underline{U}_\beta = 2,34 \sum_1^k \underline{U}_\beta \cos \beta + \frac{I}{\pi/3} \sum_1^k X_\beta; \quad (18)$$

$$\varrho' = \frac{I_n}{\pi/3} \sum_1^k X_\beta; \quad (19)$$

$$X'_\beta = \sum_1^k X_\beta. \quad (20)$$

При наличии тока небаланса явления рассматриваются для каждого плеча в отдельности. Вышеуказанные формулы действительны и в этом случае, но только для каждого плеча в отдельности, полагая при этом ток в земле равным току в соответствующем линейном проводе².

В данном случае получим для напряжения выпрямительной подстанции

$$\underline{U}_\alpha = 2,34 \sum_1^k \underline{U}_\alpha \cos \alpha - \frac{1}{\pi/3} \left[I^\oplus \sum_1^k x_\alpha^\oplus + I^\ominus \sum_1^k x_\alpha^\ominus \right], \quad (21)$$

и для инверторной подстанции

$$\underline{U}'_\beta = 2,34 \sum_1^k \underline{U}_\beta \cos \beta + \frac{1}{\pi/3} \left[I^\oplus \sum_1^k x_\beta^\oplus + I^\ominus \sum_1^k x_\beta^\ominus \right], \quad (22)$$

где знаки \oplus и \ominus определяют соответственно те величины, которые относятся к положительным и отрицательным плечам подстанций.

Если при регулировании напряжения постоянного тока плеч каждой из подстанции остаются взаимно пропорциональными, то эта пропорциональность действительна и для токов плеч:

$$I^\ominus = AI^\oplus,$$

где A — коэффициент пропорциональности.

Подставляя это значение тока в (21) и (22) получим для внешней характеристики эквивалентного выпрямителя, выраженной в функции тока положительного плеча:

$$\underline{U}'_\alpha = 2,34 \sum_1^k \underline{U}_\alpha \cos \alpha - \frac{I^\oplus}{\pi/3} \left[\sum_1^k x_\alpha^\oplus + A \sum_1^k x_\alpha^\ominus \right], \quad (23)$$

откуда для индуктивного падения напряжения:

$$\varrho' = \frac{I_n^\oplus}{\pi/3} \left[\sum_1^k x_\alpha^\oplus + A \sum_1^k x_\alpha^\ominus \right] \quad (24)$$

² Фактически ток в земле равен разности линейных токов.

и для внешней характеристики и индуктивного падения напряжения эквивалентного инвертора:

$$\underline{U}'_{\beta} = 2,34 \sum_1^k \underline{U}_{\beta} \cos \beta + \frac{I_n^{\oplus}}{\pi/3} \left[\sum_1^k x_{\beta}^{\oplus} + A \sum_1^k x_{\beta}^{\ominus} \right]; \quad (25)$$

$$\varrho' = \frac{I_n^{\oplus}}{\pi/3} \left[\sum_1^k x_{\beta}^{\oplus} + A \sum_1^k x_{\beta}^{\ominus} \right]. \quad (26)$$

Таким образом эквивалентные реактансы отрицательных плеч подстанций получаются умножением соответствующих реактансов на коэффициент пропорциональности токов.

3. Последовательно-параллельное соединение преобразователей (рис. 5)

В данном случае все вышеуказанное приложимо в отдельности для каждой из схем параллельного и последовательного соединений: рассчитывается эквивалентная

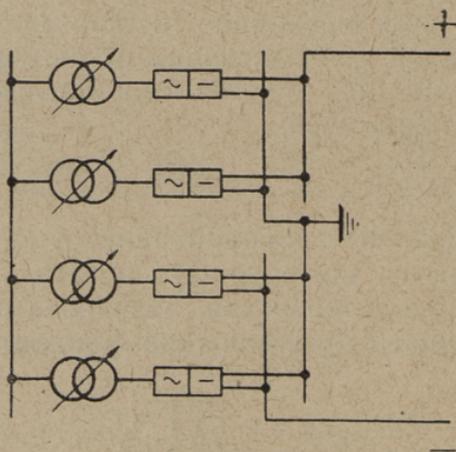


Рис. 5.

характеристика отдельно для группы параллельно соединенных и отдельно для последовательно соединенных преобразователей; затем полученные таким образом два соседних аппарата объединяются в один эквивалентный, и т. д. до получения эквивалентного преобразования всей подстанции.

Напряжение и ток инверторной подстанции определяются рабочей точкой пересечения характеристики эквивалентного инвертора с приведенной к инверторным, шинам характеристикой эквивалентного выпрямителя [Л. 1]. Для получения статизма этой последней характеристики необходимо прибавить, дополнительно к вышерассчитанным величинам индуктивного падения напряжения, падение напряжения в линии $= RI$. Рабочая точка может быть получена также обратным путем — приведением характеристики инвертора к выпрямительным шинам.

III РАБОТА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА КОНЕЧНОЙ МОЩНОСТИ

Как известно [Л. 3], в данном случае падение напряжения, вызванное коммутацией на одном вентиле, будет отзывать на напряжении шин переменного тока и, следовательно, в конечном счете, на нагрузке других, подключенных к данным шинам вентиляей.

Таким образом, указанным в предыдущем параграфе расчетам по определению характеристики эквивалентного преобразователя должен предшествовать расчет по определению напряжения шин переменного тока при различных нагрузках преобразовательной подстанции; для этой цели необходимо составить эквивалентную схему замещения питающей сети; падение напряжения переменного тока будет зависеть от соотношения сопротивления трансформатора и сопротивления остальной части питающей сети, расположенной между шинами подстанции и местом приложения эквивалентной электродвижущей силы.

В случае параллельно работающих аппаратов большое значение имеет сдвиг во времени между моментами коммутации на различных подключенных вентилях [Л. 3]: если углы коммутации перекрываются, то величина общего для данных вентиляей индуктивного падения напряжения будет пропорциональна суммарному току, выдаваемому этими вентилями; но если углы α или β на вентилях настолько разнятся друг от друга, что перекрытие не имеет места, то аппараты с меньшими углами α или β получают в моменты коммутации на отстающих вентилях дополнительное падение напряжения, а аппараты с большими углами, наоборот, при коммутации на опережающих вентилях получают соответствующее увеличение напряжения постоянного тока.

Указанное вызывает увеличение наклона характеристики у опережающих выпрямителей и уменьшение — у

отстающих. Обратная картина получается для инверторов. В результате затрудняется регулирование и распределение нагрузки между вентилями — цель, которая обычно преследуется в таких случаях.

Следовательно, при параллельной работе на шины конечной мощности перераспределение нагрузки между преобразователями лучше производить посредством воздействия на анцапфы соответствующих трансформаторов, а углы α и β держать при этом одинаковыми на всех аппаратах.

АННОТАЦИЯ

Сложность схем соединения агрегатов преобразовательных подстанций передачи постоянного тока затрудняет анализ работы таких установок.

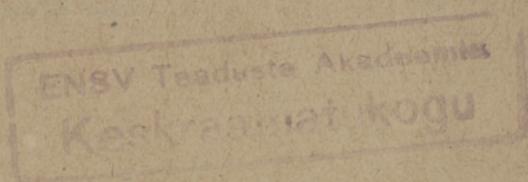
В данной работе все агрегаты подстанции заменяются одним эквивалентным, с соответствующей внешней характеристикой, аналитическое выражение которой дается для случаев параллельного и последовательного соединений агрегатов выпрямительной или же инверторной подстанции.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Р. Буачидзе. О регулировании передачи постоянного тока. Электричество, № 5, 1951.
2. I. S. Ghéorghiou. Le problème général de la repartition des puissances actives et réactives dans la marche en parallèle des centrales électriques. Institut Roumain de l'Energie, 1931.
3. P. C. Laurent. Le redresseur a vapeur de mercure: Influence des caractéristiques du réseau d'alimentation sur la marche du redresseur; Repercussions du fonctionnement du redresseur sur le réseau d'alimentation. Revue d'Electricité et de Mécanique 1938, nn. 58 et 59.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
I Цель работы	3
II Работа преобразовательных агрегатов на шины переменного тока бесконечной мощности	4
1. Параллельное соединение преобразователей	4
2. Последовательное соединение преобразователей	11
3. Последовательно-параллельное соединение преобразователей	14
III Работа преобразователей на шины переменного тока конечной мощности	16
Аннотация	18
Литература	18



Редактор Х. Эсон
Технический редактор Х. Коху
Корректор Н. Круглова

Сдано в набор 28 VII 1954. Подписано
к печати 28 IX 1954. Тираж 800. Бумага
54 × 84, 1/16. Печатных листов 1,25.
По формату 60 × 92 печатных листов 1,02.

Учетно-издательских листов 0,57.

МВ-18107. Типография имени Ханса
Хейдеманна, Тарту, Валикраави 4.
Заказ № 2498.

Цена 40 коп.