

УДК 621.331

Наведено постановку задачі визначення умов раціонального розподілу потужності тягових підстанцій постійного струму. Показано необхідність використання наведеної потужності для визначення раціональних умов розподілу потужності тягової підстанції постійного струму

Ключові слова: потужність, тягова підстанція, втрати потужності, динамічне програмування

Приведена постановка задачі определения условий рационального распределения мощности тяговых подстанций постоянного тока. Показана необходимость использования приведенной мощности для определения рациональных условий распределения мощности тяговой подстанции постоянного тока

Ключевые слова: мощность, тяговая подстанция, потери мощности, динамическое программирование

In this article the author showed the formulation of the problem of determining the conditions of rational power distribution for DC traction power substations. It's given the approach for proving the necessity of using the reduced power to determine the rational conditions of power distribution substation DC

Key words: power, traction substation, the power loss, dynamic programming

ЗАДАЧА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСЛОВИЙ РАЦИОНАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В. Г. Кузнецов

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра "Электроснабжение железных дорог"
Днепропетровский национальный университет
железнодорожного транспорта
имени академика В. А. Лазаряна
ул. Ак. Лазаряна, 2, г. Днепропетровск, Украина, 49010
Контактный тел.: (0562) 33-19-11
E-mail: vkuz@i.ua

Введение

Экономичный режим работы тяговых подстанций постоянного тока определяют количество одновременно работающих силовых трансформаторов и преобразователей, при котором будет обеспечено минимальное значение потерь электроэнергии в этих трансформаторах. Применение оборудования для своевременного отключения/подключения силовых трансформаторов и преобразователей согласно поездной ситуации (уровню нагрузки), позволяет снизить потери электроэнергии.

Вопросам обоснования условий рациональных режимов тяговых подстанций постоянного тока посвящены работы [7,8,13]. Однако, в данных работах стоимость электроэнергии принимается неизменной во времени (одноставочный тариф).

Применение тарифов, дифференцированных по времени суток и оптовых цен на электроэнергию выдвигает принципиально новые начальные условия для практически всех задач теории тягового электроснабжения. От стоимости электроэнергии зависят практически все параметры системы электроснабжения на этапе проектирования. Стоимость электроэнергии является одним из решающих исходных данных, которые определяют результаты тех-

нико-экономических расчетов и сравнений в системе тягового электроснабжения. На этапе эксплуатации от тарифа на электроэнергию зависят параметры, характеризующие рациональные режимы системы тягового электроснабжения. Вариант расчёта за потреблённую электроэнергию по оптовым ценам на сегодняшний день является для Укрзалізнички самым перспективным методом расчёта. Модели рациональных расчётов за потреблённую электроэнергию разработаны в [10] и в [14]. Поэтому на современном этапе развития науки и техники представляется целесообразным усовершенствовать методы рационального перехода на параллельную работу силовых трансформаторов тяговых подстанций и силовых агрегатов.

Целью данной статьи является постановка задачи определения условий рационального распределения мощности тяговых подстанций постоянного тока.

На рис. 1 приведена структурная схема тяговой подстанции постоянного тока. По ней довольно просто проследить составляющие потерь электроэнергии в подстанционном оборудовании тяговой подстанции постоянного тока. Общие потери активной мощности в оборудовании тяговой подстанции постоянного тока могут быть определены из следующего выражения [5]:

$$\Delta P_{\text{ТП}} = \Delta P_{\text{ПТ}} + \Delta P_{\text{ТТ}} + \Delta P_{\text{В}} + \Delta P_{\text{СФ}} + \Delta P_{\text{СН}}, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{ПТ}}$ - потери в понизительном трансформаторе;

$\Delta P_{\text{ТТ}}$ - потери в тяговом трансформаторе;

$\Delta P_{\text{В}}$ - потери в выпрямительном агрегате;

$\Delta P_{\text{СФ}}$ - потери в сглаживающем фильтре;

$\Delta P_{\text{СН}}$ - потери на собственные нужды тяговой подстанции.

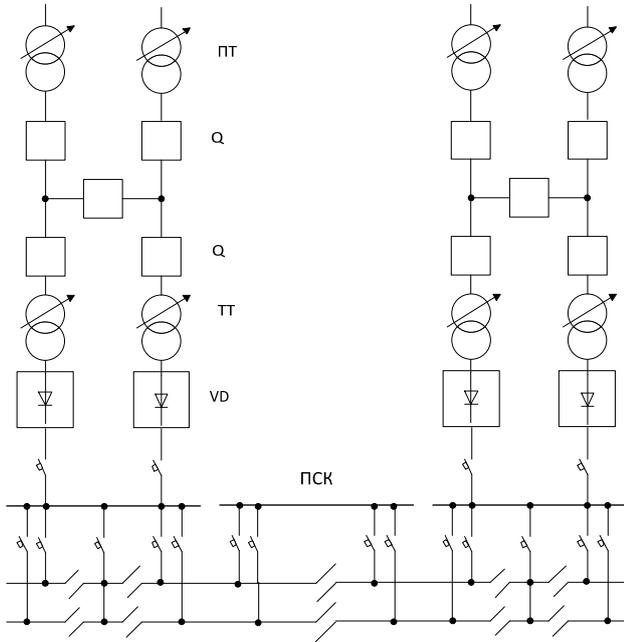


Рис. 1. Структурная схема тяговой подстанции постоянного тока с двойной трансформацией

Потери мощности в оборудовании тяговой подстанции постоянного тока

Составляющая потеря на собственные нужды тяговой подстанции $\Delta P_{\text{СН}}$ может быть определена из инструкции [1], где автор был руководителем работы. Принцип расчёта $\Delta P_{\text{СН}}$, методы применяемые при этом раскрыты в [11,12]. Рассмотрим составляющую потерь $\Delta P_{\text{ПТ}} + \Delta P_{\text{ТТ}}$. Как известно, потери в трансформаторах состоят из потерь холостого хода и потерь короткого замыкания.

$$\Delta P_{\text{ХХ}} = X_1 \cdot \Delta P_{\text{ХХПТ}} + X_2 \cdot \Delta P_{\text{ХХТТ}}, \quad (2)$$

где X_1 и X_2 - количество одновременно работающих ПТ и ТТ,

$\Delta P_{\text{ХХПТ}}$ и $\Delta P_{\text{ХХТТ}}$ - потери холостого хода ПТ и ТТ соответственно.

Потери короткого замыкания в ПТ и ТТ могут быть определены из следующего выражения:

$$\Delta P_{\text{КЗ}} = \Delta P_{\text{КЗТТ}} + \Delta P_{\text{КЗПТ}} \cdot \left(\frac{I_{\text{НОМТТ}}}{I_{\text{НОМПТ}}} \right)^2, \quad (3)$$

где $\Delta P_{\text{КЗТТ}}$ и $\Delta P_{\text{КЗПТ}}$ - потери короткого замыкания тягового и понижающего трансформатора соответственно;

$I_{\text{НОМТТ}}$ и $I_{\text{НОМПТ}}$ - номинальные токи ТТ и ПТ соответственно.

Тогда потери мощности в трансформаторах ПТ и ТТ определяются как:

$$\Delta P_{\text{T}} = \Delta P_{\text{ХХ}} + X_1 \cdot \Delta P_{\text{КЗПТ}} \cdot \left(\frac{I_{\text{НОМТТ}}}{I_{\text{НОМПТ}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{K_3}{X_1} \right)^2 + X_2 \cdot \Delta P_{\text{КЗТТ}} \cdot \left(\frac{K_3}{X_2} \right)^2, \quad (4)$$

где $k_3 = \frac{I_d}{I_{\text{дНОМ}}}$ - коэффициент загрузки преобразователя;

В (4) учтён тот очевидный факт, что потери мощности в случае параллельной работы агрегатов с суммарной нагрузкой I_d равны значению потерь в одном агрегате при нагрузке $I_{\text{п}}/X_2$, умноженной на количество параллельно работающих агрегатов, то есть в нашем случае - X_2 .

Рассмотрим составляющую потерь в преобразователях (выпрямителях) тяговой подстанции $\Delta P_{\text{В}}$.

В каждом плече мостовой секции m - пульсовой схемы содержится следующее число диодов:

- соединённых параллельно

$$a = \frac{I_{\text{дНОМ}}}{3k_{\text{сх}} I_{\text{F}}}, \quad (5)$$

где I_{F} - среднее значение допустимого прямого тока;

$k_{\text{сх}}$ - коэффициент схемы;
- соединённых параллельно

$$s = \frac{2\pi k_{\text{сх}} \cdot U_{\text{d0}}}{m \cdot U_{\text{RWM}}}, \quad (6)$$

где U_{RWM} - допустимое обратное напряжение, рекомендуемое для расчётов;

U_{d0} - выпрямленное напряжение на холостом ходе выпрямителя.

Среднее значение потерь мощности в одном диоде [5]

$$\Delta P_{\text{В}} = \left(U_{\text{т0}} + r_{\text{т}} \frac{I_d}{3k_{\text{сх}} a} \right) \cdot \frac{I_d}{3k_{\text{сх}} a}, \quad (7)$$

где $r_{\text{т}}$ - дифференциальное сопротивление;

$U_{\text{т0}}$ - пороговое напряжение диода.

Тогда во всех m плечах схемы выпрямления

$$\Delta P_{\text{В}} = \frac{U_{\text{т0}} + r_{\text{т}} k_3 I_{\text{F}}}{U_{\text{RWM}}} \cdot \frac{2\pi}{3} \cdot U_{\text{d0}} \cdot I_d, \quad (8)$$

Первый множитель в (8) зависит только от параметров диода. Умножив и разделив выражение (8) на $I_{\text{дНОМ}}$ и обозначая через постоянный коэффициент все константы приходим к выражению

$$\Delta P_{\text{В}} = C_{\text{в}} k_3, \quad (9)$$

$$\text{где } C_{\text{в}} = \frac{U_{\text{т0}} + r_{\text{т}} k_3 I_{\text{F}}}{U_{\text{RWM}}} \cdot \frac{2\pi}{3} \cdot U_{\text{d0}} \cdot I_{\text{д0}}.$$

Рассмотрим составляющую потерь $\Delta P_{\text{СФ}}$.

$$\Delta P_{\text{сф}} = C_m R_{\text{бл}} I_d^2 = C_m R_{\text{бл}} I_{\text{дном}}^2 \kappa_3^2 = C_{\text{сф}} \kappa_3^2, \quad (10)$$

где C_m и $R_{\text{бл}}$ - количество блоков и сопротивление одного блока ректора сглаживающего фильтра.

В соответствии с нормативными документами, при эксплуатации электроустановок должны осуществляться мероприятия, снижающие потребление как активной так и реактивной мощности. Такие организационно-технические мероприятия, как правило, не требуют капитальных дополнительных затрат и поэтому целесообразны во всех случаях. На тяговых подстанциях постоянного тока снизить потребление реактивной мощности можно при более рациональной эксплуатации преобразовательных агрегатов.

Величина потребляемой реактивной мощности при электротяге постоянного тока зависит от следующих основных факторов:

- коэффициента загрузки преобразовательных агрегатов;
- разности между фактическим значением напряжения на шинах 6; 10 и 35 кВ и номинальным паспортным значением напряжения сетевых обмоток преобразовательных трансформаторов;
- типа преобразовательных трансформаторов (напряжения короткого замыкания и тока холостого хода).

Исходя из этого, рассмотрим ряд возможных способов частичного снижения реактивных тяговых нагрузок подстанций постоянного тока.

Воздействовать на степень загрузки отдельных выпрямительных агрегатов и таким образом снижать потребляемую ими реактивную мощность можно, изменяя автоматически состав (число) работающих агрегатов в зависимости от нагрузки. Технически регулирование рабочей мощности тяговой подстанции осуществляется применением устройств автоматического включения и отключения резерва (АВОР).

Уменьшение реактивной мощности обеспечивается также, если своевременно отключить второй агрегат при уменьшении тока нагрузки ниже значения, определяемого точкой а.

Задачей оптимизации в данном случае является определение токовых уставок регулирования, при которых минимизируются не только потери мощности в преобразовательных агрегатах, но и результирующие потери активной мощности на преобразование, включая потери, вызываемые передачей реактивной мощности через преобразовательный, понижающий трансформаторы и по сетям энергосистемы. В качестве сопутствующего эффекта при этом достигается некоторое уменьшение реактивной мощности, потребляемой преобразовательными агрегатами.

Составим выражение, которому можно определить потери мощности в подстанционном оборудовании тяговой подстанции постоянного тока с учётом эффекта увеличения потерь активной мощности при от потребления реактивной мощности. Данные потери мощности носят название приведенных потерь мощности [2]:

$$\Delta P_{\text{прив}} = \Delta P_0 + \Delta P_{1\text{н}} \kappa_3 + \Delta P_{2\text{н}} \kappa_3^2 + \Delta P_{\text{т}} + \Delta P_3 \quad (11)$$

где ΔP_0 - постоянные потери мощности в преобразовательном агрегате; $\Delta P_{1\text{н}}$ - составляющая потеря, обусловленная суммарным пороговым напряжением вентилей при номинальном токе нагрузки $I_{\text{дн}}$; $\kappa_3 = \frac{I_d}{I_{\text{дн}}}$ - коэффициент нагрузки агрегата; $\Delta P_{2\text{н}}$ - суммарные нагрузочные потери мощности в агрегате (потери в обмотках трансформатора и уравнильного реактора, в индивидуальных сглаживающих реакторах, а также потери в вентилях, обусловленные их динамическими сопротивлениями) при номинальной нагрузке; $\Delta P_{\text{т}}$ и ΔP_3 , потери активной мощности в понижающих, преобразовательных трансформаторах тяговой подстанции и в сетях энергосистемы, вызываемые передачей реактивной мощности.

Расчёт составляющих ΔP_0 , $\Delta P_{1\text{н}}$ и $\Delta P_{2\text{н}}$ приведен выше. Потери $\Delta P_{\text{т}}$ в трансформаторах от потоков реактивной мощности могут быть определены по формуле [2]

$$\Delta P_{\text{т}} = Q^2 (\Delta P_{\text{кп}} N_{\text{п}} S_{\text{шт}}^2 + \Delta P_{\text{кт}} N_{\text{т}} S_{\text{шт}}^2), \quad (12)$$

где Q - текущее значение реактивной тяговой нагрузки подстанции, МВ·А; $\Delta P_{\text{кп}}$ и $\Delta P_{\text{кт}}$ - потери короткого замыкания соответственно в понижающем и преобразовательном трансформаторах, кВт; $S_{\text{шт}}$ и $S_{\text{шт}}$ - номинальные мощности соответственно понижающего и преобразовательного трансформаторов, МВ·А; $N_{\text{п}}$ - число понижающих трансформаторов, одновременно питающих тяговую нагрузку; $N_{\text{т}}$ - число трансформаторов в составе преобразовательного агрегата; N - число параллельно работающих преобразовательных агрегатов.

При использовании формулы (11) наибольшие затруднения вызывает расчет составляющей потерь ΔP_3 связанной с передачей реактивной мощности по сетям энергосистемы. Эти затруднения обусловлены сложностью питающей энергосистемы, к которой подключены тяговые подстанции. Задача решается достаточно просто лишь для радиальных схем питания. В сложносвязанных сетях определение составляющей ΔP_3 существенно усложняется и становится возможным лишь с помощью современных вычислительных средств. Поэтому в данном случае целесообразно обратиться к результатам подобных расчетов, которые выполнялись во Всесоюзном научно-исследовательском институте электроэнергетики (ВНИИЭ) при решении задач компенсации реактивной мощности.

Зависимость дополнительных потерь мощности в сети энергосистемы от реактивной нагрузки Q выражается формулой [9]

$$\Delta P_3 = b_1 Q + b_2 Q^2 \quad (13)$$

Коэффициенты аппроксимации b_1 , и b_2 , можно определить по данным, приведенным в [9], используя следующие соотношения:

$$b_1 = 3_{13}/C_0; b_2 = 3_{23}/C_0 \quad (14)$$

где 3_{13} и 3_{23} - расчетные коэффициенты, значения которых приведены в [6];

C_0 - удельная стоимость потерь активной мощности и электроэнергии, которая принимается по [9].

В формуле (14) расчётный коэффициент

$$Z_{2s} = \frac{d}{P} \quad (15)$$

где d - расчетный коэффициент [2]; P - расчетная активная нагрузка тяги, которая определяется по расходу электроэнергии подстанцией на тягу поездов за средние сутки месяца с наибольшим электропотреблением.

При расчётах за электроэнергию по оптовым ценам, задача определения условий рационального распределения мощности тяговой подстанции постоянного тока с двойной трансформацией может быть сведена к классической задаче динамического программирования. Теория динамического программирования достаточно хорошо развита в [3]. Остановимся сначала на физическом смысле управления распределением мощности тяговых подстанций. С точки зрения управления режимами, тяговая подстанция постоянного тока представляет для оперативного персонала не много способов по регулированию режимов. Тяговая подстанция постоянного тока имеет возможность переключения силовых трансформаторов на параллельную работу и имеется возможность перехода на параллельную работу преобразовательных агрегатов. Для этой цели на каждой тяговой подстанции постоянного тока имеется устройство автоматического регулирования мощности.

Для того, чтобы применить метод динамического программирования необходимо выполнить два условия [3]:

1. Целевая функция должна быть аддитивной;

2. Справедлив принцип оптимальности - оптимальное управление (стратегия) обладает тем свойством, что любая его часть начиная с некоторого шага также является оптимальным управлением, т. е. каким бы путем мы не пришли к некоторому состоянию на некотором шаге, оптимальное управление на последующих шагах будет таким же, как если бы это состояние было начальным.

В качестве целевой функции при управлении режимами системы тягового электроснабжения целесообразно принять следующее выражение

$$C = \left[\sum_{m=1}^T C_e(t_m) t_m \left(\sum_{i=1}^{N-1} (\Delta P_{Ti} + \Delta P_{yi} + P_i) + \sum_{i=1}^N \Delta P_{Pi} \right) + U \right], \quad (16)$$

где $C_e(t)$ - стоимость электроэнергии, которая потребляется на перевозочный процесс;

ΔP_{Ti} - потери мощности в тяговой сети i -й зоны без учета уравнительных токов;

ΔP_{yi} - потери мощности в тяговой сети i -й зоны, вызванные неравенством электродвижущих сил (ЭДС) подстанций;

P_i - мощность, потребляемая электровозом на i -й межподстанционной зоне;

ΔP_i - потери мощности в оборудовании i -й тяговой подстанции;

U - ущерб, который учитывает ненадежность трансформаторов и переключающих устройств;

T - расчётный период времени;

t_m - m -й интервал времени;

N - количество тяговых подстанций.

Если рассматривается задача рационального распределения мощности тяговой подстанции постоянно тока отдельно от задачи обеспечения рациональных режимов в тяговой сети, то соответствующие слагаемые в формуле (16) можно принять равными 0.

Наша целевая функция (16) является аддитивной. Второй принцип целиком выполняется. В [4] сформулированы практические рекомендации для постановки задач динамического программирования. Эту постановку удобно проводить в следующем порядке.

Вначале необходимо выбрать параметры (фазовые координаты), характеризующие состояние S управляемой системы (тяговой подстанции) перед каждым шагом, расчленив операцию на этапы (шаги), выяснить набор шаговых управлений x_i для каждого шага и налагаемые на них ограничения. В этом контексте состояние системы «тяговая подстанция» в каждый момент времени будет характеризовать количество одновременно работающих силовых трансформаторов и количество одновременно работающих преобразователей. Обозначим через $X = \{x_1, x_2\}$ вектор состояния тяговой подстанции. Вектор x_1 характеризует количество одновременно работающих силовых трансформаторов. И соответственно вектор x_2 характеризует количество одновременно работающих преобразователей. В соответствии с физикой процесса данные два вектора могут принимать только целые значения из диапазона (1,2) (на тяговой подстанции может одновременно работать только 1 или 2 силовых трансформатора и только 1 или 2 преобразователя). Для того, чтобы решить вопрос о необходимом количестве шагов для задачи рационального распределения мощности тяговой подстанции необходимо выполнить некоторые рассуждения.

На сегодняшний день самой прогрессивной формой расчётов за электроэнергию для магистральных железных дорог является расчёт по оптовым ценам за потреблённую электроэнергию. При данном виде расчёта необходимо один раз в час выдавать информацию о потреблённой электроэнергии на сервер оптового рынка. Исходя из этих соображений, оптимальным будет интервал в 1 час. При использовании тарифов, дифференцированных по зонам суток, дробление на интервалы по оси времени можно выполнить по длине тарифных зон. При дроблении по оси времени через 1 час получим 24 интервала за сутки. Весь процесс управления распределением мощности тяговых подстанций представим в графическом виде (см. рис. 2). В результате управления в соответствие с нашим критерием эффективности (16) можно получить рациональную траекторию управления распределением мощности тяговой подстанции (рис. 3).

Сформулируем общий принцип, лежащий в основе решения всех задач динамического программирования (его часто называют «принципом оптимальности») - каково бы ни было состояние системы S перед очередным шагом, надо выбирать управление на этом шаге так, чтобы выигрыш на данном шаге плюс опти-

мальный выигрыш на всех последующих шагах был максимальным.

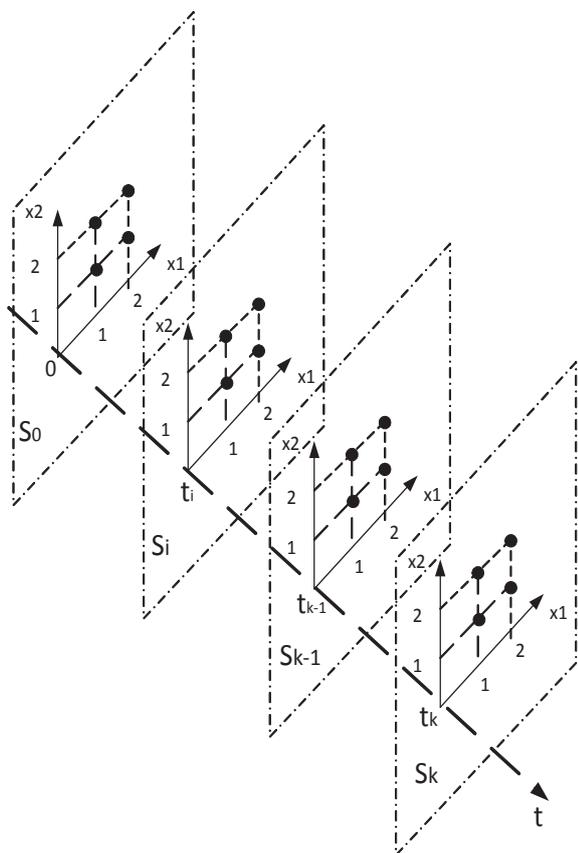


Рис. 2. Представление процесса управления распределением мощности тяговой подстанции в виде многошагового процесса

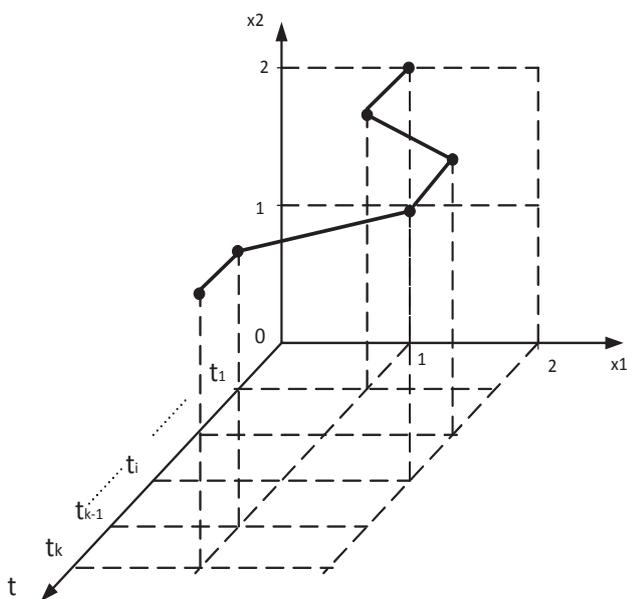


Рис. 3. Рациональная траектория процесса при управлении распределением мощности на тяговой подстанции постоянного тока с двойной трансформацией

Далее в соответствии с рекомендациями [4] необходимо:

1. Определить, какой выигрыш приносит на *i*-м шаге управление x_i , если перед этим система была в состоянии S , т. е. записать «функции выигрыша»:

$$\omega_i = f_i(S, x_i) \tag{17}$$

2. Определить, как изменяется состояние S системы S под влиянием управления x_i на *i*-м шаге, если она переходит в новое состояние

$$S' = \varphi_i(S, x_i) \tag{18}$$

«Функции изменения состояния» тоже должны быть записаны.

3. Записать основное рекуррентное уравнение динамического программирования, выражающее условный оптимальный выигрыш $W_i(S)$ (начиная с *i*-го шага и до конца) через уже известную функцию $W_{i+1}(S)$:

$$W_i(S) = \max_{x_i} \{f(S, x_i) + W_{i+1}(\varphi_i(S, x_i))\} \tag{19}$$

Этому выигрышу соответствует условное оптимальное управление на *i*-м шаге $X_i(S)$ (подчеркнем, что в уже известную функцию $W_{i+1}(S)$ надо вместо S подставить измененное состояние $S' = \varphi_i(S, x_i)$).

4. Произвести условную оптимизацию последнего (*m*-го) шага, задаваясь гаммой состояний S , из которых можно за один шаг прийти до конечного состояния, вычисляя для каждого из них условный оптимальный выигрыш по формуле (19) и находя условное оптимальное управление $x_m(S)$, для которого этот максимум достигается.

$$W_m(S) = \max_{x_m} \{f_m(S, x_m)\} \tag{20}$$

5. Произвести условную оптимизацию (*m*-1)-го, (*m*-2)-го и т. д. шагов по формуле (19), полагая в ней $i=(m-1), (m-2), \dots$, и для каждого из шагов указать условное оптимальное управление $x_i(S)$, при котором максимум достигается.

Заметим, что если состояние системы в начальный момент известно (а это обычно бывает так), то на первом шаге варьировать состояние системы не нужно - прямо находим оптимальный выигрыш для данного начального состояния S_0 . Это и есть оптимальный выигрыш за всю операцию $W^* = W_1(S_0)$.

6. Произвести безусловную оптимизацию управления, «читая» соответствующие рекомендации на каждом шаге. Взять найденное оптимальное управление на первом шаге $x_1^* = x_1(S_0)$; изменить состояние системы по формуле (18); для вновь найденного состояния найти оптимальное управление на втором шаге x_2^* и т. д. до конца.

На каждом шаге решения задачи необходимо рассчитывать потери электроэнергии в оборудовании тяговой подстанции, пользуясь вышеприведенными рекомендациями. В следующих публикациях планируется разработать алгоритм решения данной задачи.

Выводы

1. В статье предложена постановка задачи рационального распределения мощности тяговой подстанции постоянного тока с двойной трансформацией в виде задачи динамического программирования.

2. Показана необходимость использования приведенной мощности для определения рациональных условий распределения мощности тяговой подстанции постоянного тока.

Литература

1. Інструкція з нормування витрат електроенергії на власні потреби підстанцій 6-220 кВ і розподільчих пунктів 6-10 кВ залізниць України. Затв.: Наказ Укрзалізниці 08.11.2007 р. № 526-Ц [Текст] / Розроб. В.Г. Кузнецов.-К.:Мін-во трансп. України. Держ. адмін. заліз. трансп. України. Укрзалізниця,2007.-68с.
2. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость [Текст]: Учебник для вузов железнодорожного транспорта / М.П. Бадер.-М.:УМК МПС,2002.-638с.
3. Беллман Р. Прикладные задачи динамического программирования [Текст] / Р. Беллман, С. Дрейфус.-М: Наука,1965.-460с.
4. Вентцель Е.С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология [Текст]: Учеб. пособие для вузов / Е.С. Вентцель.-М.:Дрофа,2004.-208с.
5. Барковский, Б.С. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций [Текст] / Б.С. Барковский, Г.С. Магай, В.П. Маценко и др.; Под ред. М.Г. Шалимова.-М.:Транспорт,1990.-127с.
6. Жежеленко, И.В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях [Текст] / И.В. Жежеленко.-М.:Энергия,1977.-128с.
7. Доманский В.Т. Энергооптимальная технология перевозочного процесса [Текст] / В.Т. Доманский, В.П. Кручина, А.П. Юшкевич // Железнодорожный транспорт.-1993.-№№5.-С.6-13.
8. Доманська Г.А. Енергозберігаючі технології тягового електропостачання залізниць з урахуванням режимів роботи живлячих їх енергосистем [Текст]:автореф. дис...канд. техн. наук : 05.22.09 / Доманська Галина Анатоліївна;[НТУ ХПІ].-Харків:2008.-22 с.
9. Бородулин Б. М. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог [Текст] / Б.М. Бородулин, Л.А. Герман, Г.А. Николаев.-М.:Транспорт,1983.-183с.
10. Корнієнко В. В. Електрифікація залізниць. Світові тенденції і перспективи (аналітичний огляд) [Текст] / В.В. Корнієнко , О.В. Котельников , В.Т. Доманський .-К: Транспорт України,2004.-198с.
11. Кузнецов В.Г. Визначення витрати електроенергії за нормою для стаціонарних споживачів на основну роботу залізниць [Текст] / В.Г. Кузнецов // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна.-2007.-№14.-С.55-58.
12. Кузнецов В. Г. Нормування витрат електроенергії на власні потреби тягових підстанцій залізниць України [Текст] / В.Г. Кузнецов // Тези доповідей І міжнародної науково-практичної конференції «Транселектро-2007».-2007.-Місхор:ДНУЗТ.-С.42.
13. Митрофанов А.Н. Управление технологиями электропотребления и энергосбережения [Текст]: учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / А. Н. Митрофанов, М. А. Гаранин, Е. В. Добрынин .-Самара:СамГУПС,2009.-151с.
14. Скалозуб В.В. Ресурсозберігаючі методи управління тягою поїздів і удосконалення конструкцій рухомого складу [Текст]:автореф. дис...докт. техн. наук : 05.22.07 / Скалозуб Владислав Васильович;[ДНУЗТ].-Д.:2003.-37 с.