

МЕТОДОЛОГИЯ РАСЧЕТА ЗАЩИТЫ В СЕТИ ПИТАНИЯ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Криводубский О.А., Столяренко М.А.,
Донецкий государственный институт искусственного интеллекта

В наше время в общественной жизни важное место занимает городской электротранспорт. В условиях возросшего пассажиропотока и износа питающего оборудования становится актуальным вопрос повышения надёжности работы путём предотвращения возникновения аварийных ситуаций.

Рассмотрим структуру питающей сети городского электротранспорта (рис.1).

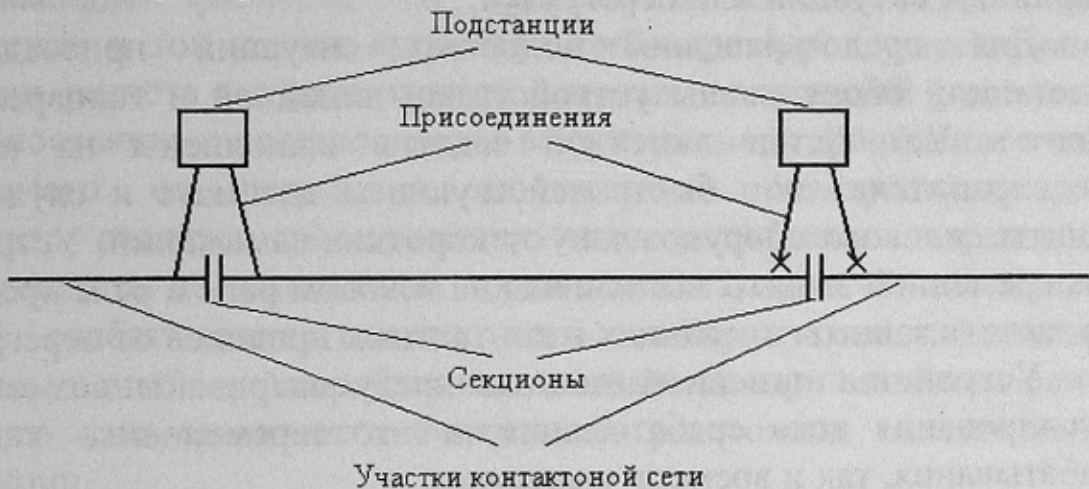


Рис.1 Структура питающей сети городского электротранспорта

Для уменьшения падения напряжения в контактной сети питание маршрутов производится по электрически изолированным участкам, разделённым друг от друга секциями. Питание большинства участков производится от отдельного присоединения тяговой подстанции. Определённая часть из них имеет резервное питание от дополнительного присоединения или отдельной подстанции. Участки, не имеющие резерва в случае аварии запитываются от соседнего участка путём замыкания секциона.

При анализе работы городского электротранспорта можно выделить следующие типы аварийных ситуаций:

1. Соскок контактных площадок вагонов с контактного провода.
2. Нахлест контактных проводов друг на друга.
3. Короткое замыкание в оборудовании вагона.
4. Обрыв контактного провода.
5. Пробой питающего кабеля.
6. Выход из строя оборудования питающей подстанции.

Первые три типа аварии обусловлены человеческими факторами и техническим состоянием подвижного состава. При этом первый и второй тип характерен исключительно для троллейбусов.

Последние три типа связаны с износом питающего оборудования, питающих и контактных проводов при возникновении аварийных ситуаций или перегрузки.

Для предотвращения подобных ситуаций присоединения подстанций оборудованы устройствами линейной и токовременной защиты. Устройства линейной защиты выполнены на плавких предохранителях или быстродействующем автомате и служат для защиты силового оборудования от коротких замыканий. Устройства токовременной защиты выполнены на токовом реле и реле времени и служат для защиты питающих и контактных проводов от перегрева.

Устройства линейной защиты предусматривают возможность регулирования тока срабатывания, а токовременной – как тока срабатывания, так и времени выдержки.

Уставки защиты присоединений тяговых подстанций зависят от величины тока нагрузки и короткого замыкания на питаемом участке, которые, в свою очередь, зависят от длины питаемого участка и количества подвижного состава на проходящих через него маршрутах, а также от рельефа местности и величины пассажиропотока. Кроме того, на значение времени выдержки токовременной защиты влияет температура окружающей среды.

При возникновении аварии на присоединении тяговой подстанции одним из вариантов восстановления электроснабжения вагонов является подключение аварийного участка к соседнему путём замыкания секциона между ними. При этом на присоединение, питающее эти два участка, с одной стороны увеличивается нагрузка, а с другой – уменьшается значение тока короткого замыкания (из-за увеличения длины питаемого участка). В этом случае необходим

пересчёт уставок защиты для присоединения, работающего в аварийном режиме.

Таким образом, при управлении состоянием питающего оборудования городского электротранспорта возникают следующие задачи:

1. Сезонный прогноз уставок защиты на определённый промежуток времени у учётом погодных условий, величины пассажиропотока и рельефа местности.

2. Прогноз уставок защиты при возникновении аварийных ситуаций.

Так как в питающих сетях электротранспорта отсутствуют сглаживающие фильтры, то подаваемое в контактную сеть напряжение и ток имеют пульсирующий характер. Существующие методики расчёта уставок защиты тяговых подстанций учитывают только постоянную составляющую выпрямленного трёхфазного тока, получаемого от первичных поставщиков электроэнергии. В результате расчётов по существующим методикам погрешность уставок защиты на подстанциях достигает 50 %, из-за чего возникают ложные срабатывания защиты или, наоборот, так называемые "мёртвые зоны" – несрабатывание защиты при возникновении короткого замыкания на значительном расстоянии от питающей подстанции.

Причиной этого является тот факт, что переменная составляющая, амплитуда которой составляет 10 – 20 % амплитуды выпрямленного тока и зависит от конкретной схемы электроснабжения, компенсируется субъективно-эмпирическими поправками. При расчёте токов короткого замыкания в контактной сети не учитывается ЭДС самоиндукции, которая возникает в понижающем трансформаторе трёхфазного тока и двигателях вагонов.

Предлагаемая методология основана на сочетании законов Ома и Кирхгофа, применяемых сегодня в обычных методиках расчёта, и закона электромагнитной индукции Ленца. Это даёт возможность корректно описать явления, происходящие как в двигателях вагонов, так и в понижающем трансформаторе при нормальном режиме работы и в режиме короткого замыкания.

С целью обеспечения надёжной защиты питающих подстанций и контактного провода от перегрузок ставится следующая задача: осуществить прогноз токов потребления вагонами электротранспорта в нормальном режиме работы и в режиме короткого замыкания. Также необходимо спрогнозировать температуру питающих кабелей и контактного провода в обоих режимах работы для корректной настройки уставок токовременной защиты.

В соответствии с этим разработана математическая модель прогноза параметров защит тяговых подстанций, которая состоит из двух подмоделей: линейной и токовременной защит.

В предлагаемой модели сила тока и напряжение рассматриваются как нестационарные процессы. Решениями уравнений модели являются законы изменения токов нагрузки и короткого замыкания, зависящие от времени.

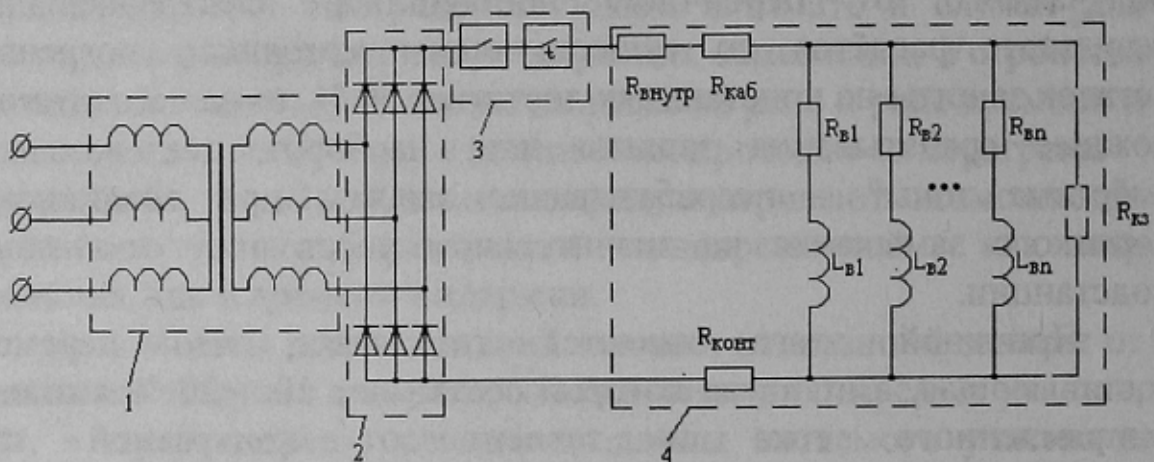


Рис. 2 Принципиальная схема питания вагонов ГЭТ

1 - понижающий трансформатор, 2 - выпрямитель, 3 - система защиты (линейная и токовременная), 4 - цепь нагрузки (вагоны и возможно сопротивление короткого замыкания)

На основе анализа структуры и схемы питания сети городского электротранспорта (рис. 2) составлена гипотеза о механизме питания и срабатывания защит на тяговых подстанциях. Согласно гипотезе схема питания разбита на 4 зоны: зону трансформатора, зону выпрямителя, зону защит и зону нагрузки.

На основе гипотезы составлены обыкновенные дифференциальные уравнения модели линейной защиты, описывающие процессы, которые происходят в соответствующих частях схемы электропитания.

Для зоны трансформатора уравнения выглядят следующим образом:

$$\varphi_1 = \left(\frac{M^2}{L_1} - L_2\right) \frac{dI_1}{dt} - \frac{M}{L_1} \varphi'_1 \quad (1)$$

$$\varphi_2 = \left(\frac{M^2}{L_1} - L_2\right) \frac{dI_2}{dt} - \frac{M}{L_1} \varphi'_2 \quad (2)$$

$$\varphi_3 = \left(\frac{M^2}{L_1} - L_2\right) \frac{dI_3}{dt} - \frac{M}{L_1} \varphi'_3 \quad (3)$$

Где $\varphi'_1, \varphi'_2, \varphi'_3$ - потенциалы фаз, подаваемых на вход трансформатора (В), $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ - потенциалы, снимаемые с трансформатора (В), I_1, I_2, I_3 - токи снимаемые с соответствующих фаз (А), L_1, L_2 - индуктивности первичных и вторичных обмоток трансформатора (Гн), M - переходная индуктивность обмоток трансформатора (Гн).

Потенциалы первичных обмоток изменяются по гармоническому закону с частотой $f=50$ герц и сдвигом фаз в 120 градусов:

$$\varphi_{A1} = A \sin(2\pi ft) \quad (4)$$

$$\varphi_{B1} = A \sin((2\pi t + 2\pi/3)f) \quad (5)$$

$$\varphi_{C1} = A \sin((2\pi t + 4\pi/3)f) \quad (6)$$

где A - амплитуда трёхфазного напряжения, подаваемого на подстанцию.

Уравнения зоны выпрямителя имеют следующий вид:

$$U = \varphi_A - \varphi_B \quad (7)$$

$$\varphi_A = \max\{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3\} \quad (8)$$

$$\varphi_B = \min\{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3\} \quad (9)$$

$$I_1 = \begin{cases} I, \text{если } \varphi_A = \varphi_1 \\ -I, \text{если } \varphi_B = \varphi_1 \\ 0, \text{иначе} \end{cases} \quad (10)$$

$$I_2 = \begin{cases} I, \text{если } \varphi_A = \varphi_2 \\ -I, \text{если } \varphi_B = \varphi_2 \\ 0, \text{иначе} \end{cases} \quad (11)$$

$$I_3 = \begin{cases} I, \text{если } \varphi_A = \varphi_3 \\ -I, \text{если } \varphi_B = \varphi_3 \\ 0, \text{иначе} \end{cases} \quad (12)$$

где φ_A, φ_B – потенциалы выпрямителя (В), U – напряжение, отводимое от подстанции отводимое от подстанции (В), I – ток, протекающий через предохранители (А), $R_{\text{внутр}}$ – внутреннее сопротивление подстанции, $R_{\text{каб}}$ – сопротивление питающих кабелей, $R_{\text{конт}}$ – сопротивление контактного провода.

Уравнения зоны нагрузки представлены следующим образом. Закон изменения тока j -го вагона:

$$L_{\text{вж}} \frac{dI_{\text{вж}}}{dt} + I_{\text{вж}} R_{\text{вж}} = U - I(R_{\text{внутр}} + R_{\text{каб}} + R_{\text{конт}}) \quad (13)$$

Сопротивление питающих кабелей и контактного провода рассчитывается с учётом нагрева под действием тока и температурных характеристик окружающей среды:

$$R_{\text{каб}} = k_1 \mu_{\text{каб}}^0 \frac{L_{\text{каб}}}{S_{\text{каб}}} (1 + \alpha_{\text{каб}} T_{\text{каб}}) \quad (14)$$

$$R_{\text{конт}} = k_2 \mu_{\text{конт}}^0 \frac{L_{\text{конт}}}{S_{\text{конт}}} (1 + \alpha_{\text{конт}} T_{\text{конт}}) \quad (15)$$

где $\mu_{\text{каб}}^0$ – удельное сопротивление питающего кабеля при температуре 0°C , $\mu_{\text{конт}}^0$ – удельное сопротивление контактного провода при температуре 0°C ; $\alpha_{\text{каб}}$ и $\alpha_{\text{конт}}$ – температурные коэффициенты материалов питающего кабеля и контактного провода соответственно; $T_{\text{каб}}$, $T_{\text{конт}}$ – температура кабеля и контактного провода под нагрузкой, $L_{\text{каб}}$, $L_{\text{конт}}$ – длина кабеля и контактного провода, $S_{\text{каб}}$, $S_{\text{конт}}$ – сечение кабеля и контактного провода, k_1, k_2 –

коэффициенты, определяющие наличие перемычек, соединений и стыков.

Ток потребления в нормальном режиме работы:

$$I = \sum n_j I_{Bj} \quad (16)$$

Ток потребления в режиме короткого замыкания:

$$I = \frac{R_{кз} \sum n_j I_{Bj} + U}{R_{кз} + R_{внутр} + R_{каб} + R_{конт}} \quad (17)$$

где U_B – напряжение на двигателе вагона (В) I_{Bj} – ток двигателя вагона j -го типа (А), n_j – количество вагонов j -го типа на участке, $R_{кз}$ – сопротивление участка, на котором произошло короткое замыкание.

Решая систему уравнения (1) - (16), находим закон изменения тока нагрузки в рабочем режиме $I_{норм}(t)$. Решением системы (1) – (15), (17) является закон изменения тока в режиме короткого замыкания $I_{кз}(t)$.

При разработке подмодели токовременной защиты использованы закон Джоуля - Ленца и начала термодинамики. Уравнения подмодели выглядят следующим образом:

Температура провода в установившемся режиме:

$$T_{уст} = I_0^2 \frac{\mu}{kS} + T_0 \quad (18)$$

Откуда максимальный ток нагрузки составит:

$$I_{макс} = \sqrt{(T_K - T_0) \frac{kS}{\mu}} \quad (19)$$

Температура провода при возникновении короткого замыкания:

$$T(t) = \frac{T_{уст}}{k} - (I_{твз}^2 - I_0^2) \frac{\mu}{kS} e^{-\frac{k}{c\rho S}t} \quad (20)$$

Время выдержки токовременной защиты:

$$t_{выдержки} = \frac{c\rho S}{k} \ln \frac{(I_{твз}^2 - I_0^2) \frac{\mu}{kS}}{\frac{T_{уст}}{k} - T_K} \quad (21)$$

где I_0 – ток нагрузки (А), T_0 – температура окружающей среды ($^{\circ}\text{C}$), μ - удельное сопротивление проводов ($\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$), S - сечение

проводов (мм^2), k – параметр ($\text{Вт}/^\circ\text{C}$), c – теплоємність проводів ($\text{Дж}/\text{кг}/^\circ\text{C}$), ρ – плотність матеріала проводів ($\text{кг}/\text{м}^3$), T_k – предельная температура нагрева провода ($^\circ\text{C}$).

Подставляя в полученные формулы числовые значения получаем значения временных уставок токовременной защиты.

Для определения токовых уставок защиты находим максимум тока потребления в нормальном режиме (I_0):

$$I_0 = \max_t(I_{\text{норм}}(t)) \quad (22)$$

и минимум тока короткого замыкания (I_k):

$$I_k = \min_t(I_{\text{кз}}(t)) \quad (23)$$

Если $I_0 < I_k$, то минимальный ток короткого замыкания превышает максимальный ток потребления, поэтому ток уставки линейного автомата

$$I_{\text{уст л}} = I_k \quad (24)$$

При этом вычисляем по формуле (19) максимально допустимый ток нагрузки $I_{\text{макс}}$, и если он превышает ток потребления, то необходимо изменить условия расчёта.

Затем сравниваем значения максимально допустимый ток нагрузки с минимальным током короткого замыкания. Если последний оказался больше, то устанавливаем токовую уставку токовременной защиты равную полусумме сравниваемых величин.

$$I_{\text{ТВЗ}} = \frac{I_{\text{макс}} + I_k}{2} \quad (25)$$

Если ток короткого замыкания не превышает максимально допустимого тока, то токовременной защиты не требуется.

И наконец, если $I_0 \geq I_k$, то максимальный ток потребления превышает ток короткого замыкания, поэтому необходимо изменить условия расчёта.

Данная методология положена в основу алгоритма автоматизированной системы принятия решений при управлении состоянием питающей сети городского электротранспорта. Эта система позволит рассчитывать токи нагрузки и параметры защиты питающих подстанций в нормальном режиме работы и в режиме резервного подключения другой подстанции, управление

телеметрией оборудованим подстанций, а также при возникновении аварии принимать решения по восстановлению работы городского электротранспорта.

Данная методология инвариантна относительно структуры контактной сети, устройств питающих подстанций и типов вагонов и может применяться в службах электрохозяйства как городского, так и железнодорожного транспорта.

ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ОРГАНІЗАЦІЇ ДИСТАНЦІЙНОГО ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ

Воропаєва В.Я., Пономаренко О.Г.,
Донецький національний технічний університет

Одним з найбільш перспективних напрямків розвитку системи освіти є широке використання сучасних телекомунікаційних, інформаційних і комп'ютерних технологій, в першу чергу – технологій глобальної мережі Інтернет. Гнучкий та оперативний доступ до інформації з будь якої точки, широкі можливості пошуку потрібних даних, своєчасне оновлення та інші достоїнства сучасних інформаційних технологій стимулюють активне застосування їх в практиці багатьох навчальних закладів, зокрема у вигляді дистанційних елементів навчання.

Розгалужена система дистанційних навчальних центрів вже багато років успішно функціонує у віртуальних університетах в Західній Європі, США, Канаді, Австралії. Їх навчальні центри використовують клієнт-серверні технології, реалізовані у вигляді інтегрованих навчальних платформ для електронного навчання через Інтернет – Web Based E-learning (WBE) систем. Такі інтегровані платформи надають можливість створювати і підтримувати учбові курси за чотирма основними компонентами[1]:

- викладення,
- діяльність,
- процес передачі інформації,
- адміністрування.