

С.В. Дыбрин, И.С. Сиверин

(Украина, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет")

СОСТАВЛЯЮЩИЕ НАГРУЗКИ ТЯГОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПОДСТАНЦИИ БЕСКОНТАКТНОГО ШАХТНОГО ТРАНСПОРТА

Постановка проблемы. Задача выравнивания графика нагрузки тяговой преобразовательной подстанции ТОВ1-160-1,2к-4000-УХЛ4 шахтного бесконтактного транспорта связана с возможностью увеличения числа используемых электровозов (В14-900) при неизменных прочих условиях. Первым этапом при исследовании данного вопроса является анализ составляющих нагрузки тяговой преобразовательной подстанции бесконтактного транспорта.

Цель статьи. Анализ составляющих нагрузки тяговой преобразовательной подстанции шахтного электровозного транспорта с бесконтактной передачей энергии.

Анализ исследований и публикаций. В известных литературных источниках по теме транспорта с бесконтактной передачей энергии анализ составляющих нагрузки тяговой преобразовательной подстанции в предлагаемой форме не проводился.

Результаты исследования. Мощность, выдаваемую преобразовательной подстанцией, можно разложить на три составляющие [1]: затрачиваемую на движение поездов, идущую на собственные нужды подвижных составов и потерь.

Мощность, затрачиваемая преобразовательной подстанцией на движение поездов, изменяется в значительных пределах и зависит от: количества функционируемых электровозов, длины состава, схемы движения и организации работы, графика и правил грузового движения и перевозки рабочих, правил выполнения маневровых работ и технической эксплуатации, профиля и состояния пути. Эта мощность ограничивается двумя другими составляющими в структуре нагрузок преобразовательной подстанции – мощностью собственных нужд электровозов и мощностью потерь.

С учетом заводских данных и опыта эксплуатации, мощность, идущая на собственные нужды электровоза, составляет приблизительно 2,7 кВт.

Структуру потерь энергии можно представить следующим образом.

Потери, связанные с функционированием тяговой сети:

- в сопротивлении кабеля сети;
- в компенсирующих конденсаторах;
- во взрывобезопасных оболочках конденсаторов;
- в стальной крепи откаточной выработки, рельсах, броне силовых кабелей, металлических элементах состава;
- в породе.

Потери, связанные с функционированием подвижного состава:

- в активных сопротивлениях обмотки энергоприемника, цепях питания двигателя, двигателе;
- механические – при движении состава;
- в экране, защищающем стальные части подвижного состава и машиниста от воздействия магнитного потока, создаваемого энергоприемником;
- вносимые неэкранированными частями подвижного состава в стальную крепь откаточной выработки и других проводящих элементах, попадающих в зону действия магнитного поля, создаваемого энергоприемником;
- в сердечнике энергоприемника;
- в компенсирующих конденсаторах приемного контура;
- в породе.

Мощность, теряемая в сопротивлении кабеля сети, пропорциональна погонному сопротивлению кабеля $R_{0,l}$ и длине линии l_l .

Кабель тяговой сети типа ПШСЛ изготовлен с применением медного проводника эквивалентным сечением 90 мм². При эксплуатации бесконтактной сети вследствие потерь происходит нагрев кабеля. Так, при протекании тока $I = 150$ А в 1 м кабеля за $t = 1$ с выделится $Q = I^2 \cdot t \cdot R_{0,l} = 22,5 \cdot 10^3 \cdot R_{0,l}$ Дж тепла. Погонное сопротивление $R_{0,l} = (\rho/90) \cdot (1 + \alpha(T_1 - T_0))$ Ом/м, где $\rho = 0,0178$ Ом·мм²/м – удельное сопротивление медной проволоки при $T_0 = 20$ °С; $\alpha = 0,004$ °К⁻¹ – термический коэффициент сопротивления; T_1 – температура меди кабеля, °С. Площадь S поверхности кабеля длиной 1 м без изоляции можно найти, зная диаметр поливинилхлоридного сердечника (17,5 мм), эквивалентное сечение медного

проводника (90 мм^2), коэффициент, показывающий долю площади общего сечения проводников в площади кругового кольца, обрамляющего сечение стренг с проводниками ($0,9069^2$) [2]:

$$S = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot (17,5 \cdot 10^{-3}/2)^2 + 90 \cdot 10^{-6}/0,9069^2}{\pi}} \cdot 1 = 66,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Количество выделившегося тепла через изоляцию определяется с помощью уравнения теплопроводности [3]:

$$Q = k \cdot S \cdot ((T_1 - T_2)/l) \cdot t,$$

где $Q = 22,5 \cdot 10^3 \cdot R_{0,t}$, Дж; $S = 0,0663 \text{ м}^2$ – площадь поверхности кабеля без изоляции; T_1 – температура меди кабеля, °С; $T_2 = 35^\circ\text{С}$ – температура внешней поверхности изоляции кабеля, °С; $l = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – толщина изоляции кабеля; $t = 1 \text{ с}$ – время, в течение которого перемещалось тепло; $k = 0,12 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ [4] – коэффициент теплопроводности изоляционно-защитной оболочки из поливинилхлоридного пластиката. Подставив все составляющие, получим температуру меди кабеля в установившемся режиме работы сети:

$$22,5 \cdot 10^3 \cdot (0,0178/90) \cdot (1 + 0,004(T_1 - 20)) = 0,12 \cdot 0,0663 \cdot ((T_1 - 35)/3,5 \cdot 10^{-3}) \cdot 1;$$

$$T_1 = 37,1 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Погонное сопротивление кабеля в установившемся режиме работы сети:

$$R_{0,t} = (\rho/90) \cdot (1 + \alpha(T_1 - T_0)) = (0,0178/90) \cdot (1 + 0,004(37,1 - 20)) = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}/\text{м}.$$

При расчёте потерь в кабеле следует иметь в виду, что для подключения компенсирующих конденсаторов используются отводы. Учитывая, что прямой и обратный провода тяговой сети располагаются в горизонтальной плоскости с расстоянием между осями $400 \pm 30 \text{ мм}$ и подвешиваются симметрично относительно вертикальной оси рельсового пути на высоте $1900 \pm 30 \text{ мм}$ от уровня головки рельса, а расстояние от вертикальной оси рельсового пути до ниши с конденсаторами примем $1360/2 + 250 = 930 \text{ мм}$, где 1360 – ширина электровоза (ширина вагонетки ВГ(УВГ)–3,3-900 [5] меньше ширины электровоза и составляет 1320 мм), тогда длина одного отвода будет порядка $1900 + 930 = 2830 \text{ мм}$. В компенсационном пункте располагаются конденсаторы, подключенные к прямому и обратному кабелю тяговой сети, поэтому общая длина отводов на одном компенсационном пункте $4 \cdot 2830 = 11320 \text{ мм}$ или $11,32 \text{ м}$. Компенсационные пункты располагаются через каждые 225 м . При длине маршрута, например, 2000 м таких пунктов будет $2000/225 \approx 9$, а общая длина отводов $11,32 \cdot 9 = 101,88 \text{ м}$.

Два кабеля тяговой сети подвешиваются с перекрещиванием – транспозицией. Длину, на которую увеличился кабель за счёт одной транспозиции, можно определить, зная длину участка транспозиции $a = 0,5 \text{ м}$ и расстояние между прямым и обратным кабелями $b = 0,4 \text{ м}$:

$$2 \cdot (\sqrt{a^2 + b^2} - a) = 2 \cdot (\sqrt{0,5^2 + 0,4^2} - 0,5) = 0,281 \text{ м}.$$

Исходя из опыта эксплуатации, рекомендуется при проектировании стремиться совместить пункты транспозиции тяговой сети с расположением компенсирующих конденсаторов. Расстояние между пунктами транспозиции не следует устанавливать более, чем 75 м . Согласно этим условиям расстояние между пунктами транспозиции для рассматриваемого маршрута составит 75 м . Количество пунктов будет равно $2000/75 \approx 27$. Тогда общее увеличение длины кабеля за счёт транспозиции $0,281 \cdot 27 = 7,587 \text{ м}$.

Следует учесть провисание кабелей сети. Регламентированный зазор между подвеской тяговой сети и крышкой энергоприёмника составляет 50 мм . Расстояние между элементами подвески не должно превышать $1,5 \text{ м}$. По правилам эксплуатации провисающий кабель не должен касаться энергоприёмника. Примем допустимую высоту провеса 45 мм . Согласно работе [6] длина кабеля в пролёте определяется

Электропоставления та электроустаткування

зависимостью $L = l + (8f^2)/(3l)$ м, где $l = 1,5$ м – длина пролёта; $f = 4,5 \cdot 10^{-2}$ м – стрела провеса. Отсюда коэффициент, учитывающий увеличение длины кабеля за счёт провеса:

$$L/l = 1 + (8f^2)/(3l^2) = 1 + (8 \cdot (4,5 \cdot 10^{-2})^2)/(3 \cdot 1,5^2) = 1,0024.$$

Таким образом, при длине маршрута 2 км длина кабеля, с учётом провеса, следующая: $2 \cdot 2000 \cdot 1,0024 = 4009,6$ м.

Общая длина кабеля

$$l_{\kappa} = 4009,6 + 101,88 + 7,587 = 4119 \text{ м.}$$

Мощность потерь в кабеле сети

$$\Delta P_{R.l.} = I_l^2 \cdot R_{0.l.} \cdot l_{\kappa} = 150^2 \cdot 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot 4119 = 19462,3 \text{ Вт.}$$

Мощность, теряемую в компенсирующих конденсаторах сети, можно учесть в виде эквивалентного сопротивления [7]: $R_{\kappa} = \frac{1}{\omega} \cdot \sum_1^n \frac{\text{tg} \delta}{C_{\kappa}}$, где $n = 18$ – число компенсирующих групп конденсаторов на линии (по 2 группы в компенсационном пункте); ω – частота приложенного напряжения; C_{κ} – ёмкость группы конденсаторов; $\text{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь группы конденсаторов. Учитывая, что каждая компенсирующая группа состоит из двух последовательно соединённых конденсаторов ёмкостью по 11,5 мкФ из конденсаторного модуля КСПР-0,5-5-Т5 с $\text{tg} \delta = 0,0004$, потери составят:

$$\Delta P_{\kappa.l.} = I_l^2 \cdot R_{\kappa} = 150^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^3} \cdot \sum_1^{18} \frac{0,0004}{(11,5/2) \cdot 10^{-6}} = 896,8 \text{ Вт.}$$

Согласно работе [7] и опыту промышленной эксплуатации новой системы транспорта, рекомендуется учитывать потери во взрывобезопасных оболочках конденсаторов, в горных породах и элементах крепи на уровне 10 % потерь в тяговой сети, т.е.

$$\Delta P_{\text{en.}} = P_{R.l.} \cdot 0,1 = 19438,7 \cdot 0,1 = 1943,87 \text{ Вт.}$$

Общие потери, связанные с функционированием тяговой сети на маршруте 2 км:

$$\Delta P_{\text{л}} = \Delta P_{R.l.} + \Delta P_{\kappa.l.} + \Delta P_{\text{en.}} = 19462,3 + 896,8 + 1943,87 = 22302,97 \text{ Вт.}$$

Потери, отнесённые к длине маршрута:

$$\Delta P_{\text{л}}^n = \Delta P_{\text{л}} / l = 22302,97 / 2 = 11,15 \text{ кВт/км.}$$

Соответственно паспортным данным электровоза сопротивление потерь приёмно-силового контура принимается равным 0,15 Ом.

При часовом токе двигателей 152 А мощность, теряемая на электровозе, составит:

$$\Delta P_{\text{э}} = (2 \cdot 152)^2 \cdot 0,15 = 13,86 \text{ кВт.}$$

Составляющая нагрузки преобразовательной подстанции, идущая на покрытие потерь энергии в зависимости от протяжённости маршрута l и числа электровозов N на линии:

$$\Delta P_n = \Delta P_{\text{л}}^n \cdot l + \Delta P_{\text{э}} \cdot N.$$

Выводы. Мощность, затрачиваемая преобразовательной подстанцией на движение поездов, изменяется в значительных пределах и зависит от многих приведенных в данной статье факторов. Эта мощность ограничивается мощностью собственных нужд электровозов и мощностью потерь.

Мощность, идущая на собственные нужды электровоза, составляет приблизительно 2,7 кВт.

Потери, вызванные функционированием линии и отнесённые к длине маршрута, составляют 11,15 кВт/км.

Мощность, теряемая на электровозе при часовом токе двигателей 152 А, – 13,86 кВт.

Список литературы

1. Высокочастотный бесконтактный электрический транспорт / В.Е.Розенфельд, Н.А.Староскольский – М.: Транспорт, 1975. – 208 с.
2. Ласло Фейеш Тот. Расположения на плоскости, на сфере и в пространстве. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1958.
3. Справочник по элементарной математике, механике и физике. Изд. 11-е. – Мн.: Наука и техника, 1971.
4. http://sp-department.ru/polymer_wiki/Поливинилхлорид/
5. <http://www.donerm.com.ua/vagonetka.html>
6. Крюков К.П., Новгородцев Б.П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи. 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1979 г. – 312 с., ил.
7. Транспорт с индуктивной передачей энергии для угольных шахт / Г.Г. Пивняк, И.П. Ремизов, С.А. Саратикянц (д.б. все авторы); под ред. Г.Г. Пивняка. – М.: Недра, 1990. – 245 с.

Рекомендовано до друку: канд. техн. наук, доц. Зражевський Ю.М.