

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 пластика. 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. Сараткиянц (д.б. все авторы); под ред. Г.Г. Пивняка. – М.: Недра, 1990. – 245 с.

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

УДК 621.316.925

*F.P. Shkrabets, DE, professor; A.V. Ostapchuk, candidate of science
(Ukraine, Dnepropetrovsk, State HEI "National Mining University")*

MODERN DEVELOPMENT PRINCIPLES OF PROTECTION AND DIAGNOSTICS IN MINING FACILITIES MAINS AND DISTRIBUTION GRIDS

Introduction. Electrical power systems grids and equipment of mines and quarries in Ukraine are operated in very specific circumstances, which to a large extent determine the level of power supply reliability and electrical safety. Improving of the electrical safety conditions and the reliability of mining facilities power supply depends on the successful resolution of the range of issues, the most important of them are problems of creation of methods and tools that provide prevention, search and restoration of the power supply damages. Analysis of operational crash data in mining facilities distribution grids shows that the share of ground faults is up to 65...90% of the total number of failures, most of which are related to the phase-to-ground insulation violation of the grid, i.e. to asymmetric faults emersion /1, 2/.

The main results of the research. Most of the damages in the distribution grids lead to a decrease in the level of electrical safety and reliability of electricity supply. Further, the reduction of power supply reliability leads to an increase in the share of losses from power supply outage. In general, this damage is determined by the duration of mining and transport machines idle-time and, thereafter, leads to product undersupply. Unwarranted downtime of mining and support mechanisms occurs as a result of wrong action of first and second protection level devices against ground faults due to the significant time searching for missing damages (with a false protection devices actuation). In addition, the ground-faults are often the cause of multi-phase damage, thereby increasing the amount of machinery idle.

The reliability of power supply is largely dependent on the quality of the ground fault protection functioning in the distribution grid. Furthermore, it was found that, ceteris paribus, the quality of named protections depends on the structure and construction of the neutral mode. The studies have shown that the main cause of false protection actuation against ground faults in networks with fully insulated or compensated neutral should be considered as the emergence in the network, after turning off the damaged connection (or damage self-destruct), an oscillatory process with a frequency close to the 50 Hz. In general, the time-changing process of the neutral shift voltage in system after disconnection or damage disengagement can be described by a differential equation

$$\frac{d^2 U_0(t)}{d t^2} + \left(\frac{3 R_l + R}{3 \omega C R_l R} \cdot \frac{d U_0(t)}{d t} \right) - \frac{1}{3C L_p} U_0(t) = 0, \quad (1)$$