

ГОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

2
2011

Учредитель: Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

Главный редактор
КАНТОВИЧ Л.И.

Зам. гл. редактора
ИВАНОВ С.Л.
ЛАГУНОВА Ю.А.

Редакционный совет:

КОЗОВОЙ Г.И.
(сопредседатель)
ТРУБЕЦКОЙ К.Н.
(сопредседатель)
АНТОНОВ Б.И.
ГАЛКИН В.А.
КОЗЯРУК А.Е.
КОСАРЕВ Н.П.
МЕРЗЛЯКОВ В.Г.
НЕСТЕРОВ В.И.
ЧЕРВЯКОВ С.А.

Редакционная коллегия:

АНДРЕЕВА Л.И.
ГАЛКИН В.И.
ГЛЕБОВ А.В.
ЕГОРОВ А.Н.
ЕДЫГЕНОВ Е.К.
ЖАБИН А.Б.
ЗЫРЯНОВ И.В.
КАРТАВЫЙ Н.Г.
КРАСНИКОВ Ю.Д.
КУЛАГИН В.П.
МАХОВИКОВ Б.С.
МИКИТЧЕНКО А.Я.
МЫШЛЯЕВ Б.К.
ПЕВЗНЕР Л.Д.
ПЛЮТОВ Ю.А.
ПОДЭРНИ Р.Ю.
САВЧЕНКО А.Я.
САМОЛАЗОВ А.В.
СЕМЕНОВ В.В.
СТАДНИК Н.И.
СТРАБЫКИН Н.Н.
ХАЗАНОВИЧ Г.Ш.
ХОРЕШОК А.А.
ЮНГМЕЙСТЕР Д.А.

Редакция:

БЕЛЯНКИНА О.В.
ДАНИЛИНА И.С.

Телефоны редакции:

(499) 269-53-97, 269-55-10

Факс (499) 269-55-10

E-mail: gma@novtex.ru

<http://novtex.ru/gormash>

СОДЕРЖАНИЕ

ПОДЗЕМНЫЕ РАБОТЫ

- Мазеин С.В.** Эффективность комплексного геотехнического обеспечения технологических процессов тоннелепроходческого щита 2
Габов В.В., Банников А.А., Бойков И.П. Анализ измельчения угля при добыче на шахтах Воркуты 9

ОТКРЫТЫЕ РАБОТЫ

- Хромой М.Р., Свиначук В.П., Свиначук П.В.** Анализ влияния объема добычи железной руды на стойкость зубьев ковша карьерного экскаватора 13

ПОДВОДНАЯ РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

- Тарасов Ю.Д.** Комплексы для добычи железомарганцевых конкреций с морского дна 17

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

- Гуревич В.И.** Защита трансформаторов тока от работы в режиме с разомкнутой вторичной цепью 26
Кузьмин Р.С., Павлов В.В., Майнагашев Р.А., Зыков И.С., Дементьев В.В. Влияние коммутационных перенапряжений на надежность систем электроснабжения 6 кВ шахт и рудников 31

СТАЦИОНАРНЫЕ УСТАНОВКИ

- Стрелков М.А.** Оценка состояния шахтных подъемных установок по данным системы постоянного контроля параметров 34
Долганов А.В. Анализ электропотребления водоотливных установок подземных рудников медно-колчеданных месторождений Южного Урала 39

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Линник Ю.Н., Линник В.Ю.** Расчет параметров исполнительных органов очистных машин на основе электронного банка данных о характеристиках разрушаемости угольных пластов 42

НАУЧНЫЕ РАЗРАБОТКИ

- Сидоренко В.А., Степанов А.Г., Молоковский И.А.** Коэффициент трения канатов по футеровке и возможные перегрузки грузовой ветви шахтного многоканатного подъема 51

ИНФОРМАЦИЯ

- Памяти** Юрия Дмитриевича Красникова 56

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, и входит в систему Российского индекса научного цитирования.

Р.С. Кузьмин, канд. техн. наук, **В.В. Павлов**, канд. техн. наук, **Р.А. Майнагашев**, **И.С. Зыков**, СФУ, г. Красноярск, **В.В. Дементьев**, гл. энергетик, ООО "Шахтомонтажладка", г. Абакан

E-mail: rutas2004@list.ru

Влияние коммутационных перенапряжений на надежность систем электроснабжения 6 кВ шахт и рудников

Проанализирована аварийность систем электроснабжения 6 кВ шахт и рудников с учетом эксплуатации вакуумных выключателей и показано, что наиболее повреждаемыми элементами системы электроснабжения из-за воздействия коммутационных перенапряжений являются разделки кабелей и силовые сухие трансформаторы, которые эксплуатируются совместно с нелинейными ограничителями перенапряжений.

Установлено влияние параметров RC-цепей, используемых для защиты трансформаторов от коммутационных перенапряжений, на уровень перенапряжений и величину тока однофазного замыкания на землю.

Предложен и экспериментально опробован способ ограничения коммутационных перенапряжений, основанный на компенсации тока холостого хода трансформатора.

Ключевые слова: шахта, система электроснабжения, вакуумный выключатель, трансформатор, коммутационные перенапряжения, RC-цепь, однофазное замыкание на землю, ток среза.

R.S. Kuzmin, V.V. Pavlov, R.A. Mainagashev, I.S. Zykov, V.V. Dementyev

The Influence of Commutation Overvoltage on the Reliability of Power Supply Systems of 6 kV for Mines and Pits

There is analysed the accident rate of power supply systems of 6 kV for mines and pits considering using vacuum switches. It is also shown that the most damageable elements of the power supply system because of the influence of commutation overvoltage, are cable terminations and dry-type power transformers which are used together with non-linear overvoltage limiters.

There is determined the influence of RC-circuit parameters, used to protect transformers from commutation overvoltage, upon the level of overvoltage and the value of the single-phase ground fault.

There is suggested and experimentally checked a method of limiting commutation overvoltage, which is based on compensating the current of the transformer idle running.

Keywords: mine, power supply systems, vacuum switch, transformer, commutation overvoltage, RC-circuit, single-phase ground fault, the value of the current from which a sharp decrease starts.

Надежность систем электроснабжения 6 кВ шахт и рудников в первую очередь определяется безаварийной эксплуатацией отдельных элементов системы электроснабжения: коммутационной аппаратуры, кабельных линий, передвижных трансформаторных подстанций.

Анализ аварийности систем электроснабжения 6 кВ шахт Кузбасса, рудников Пермского края и Якутии показал, что с внедрением вакуумных выключателей выход из строя коммутационных аппаратов практически прекратился. Это указывает на высокую надежность вакуумных выключателей. Однако аварийность кабельных линий возросла в 2,6 раза. Наиболее повреждаемыми элементами в кабельной линии являются кабельные муфты и разделки кабелей. На долю кабельных муфт и разделок кабелей соответственно прихо-

дится 25 и 68 % аварийных отключений кабелей. Электрический пробой изоляции разделок кабелей происходит практически в 2,7 раза чаще, чем у кабельных муфт. В основном электрический пробой происходит в кабельных разделках, подключенных к вводам высоковольтных электродвигателей и силовых трансформаторов. При этом электрические пробой изоляции обмоток трансформаторов и электродвигателей возросли в 1,6 и 4,8 раза соответственно.

В данной ситуации настораживает тот факт, что аварийность трансформаторов, эксплуатируемых в шахтах и рудниках, при коммутации их вакуумными выключателями намного выше, чем у электродвигателей. В то время как на поверхностных комплексах шахт и рудников аварий-

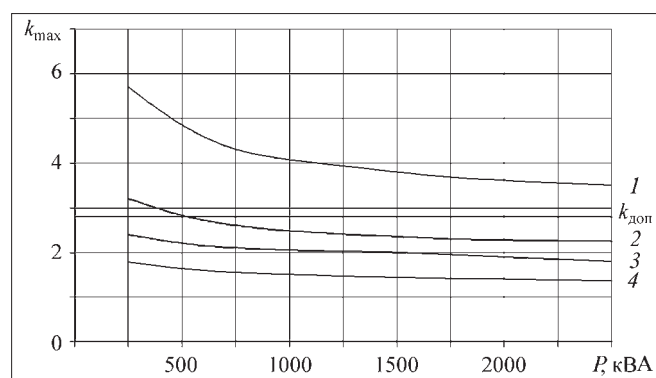
ность высоковольтных электродвигателей гораздо выше, чем у трансформаторов.

Детальный анализ аварийности передвижных трансформаторных подстанций показывает, что в настоящее время существует две схемы коммутации силовых трансформаторов, установленных на передвижных подстанциях, которые существенно влияют на аварийность трансформаторов.

По первой схеме коммутация передвижной трансформаторной подстанции (ПТП) выполняется с помощью вакуумного выключателя, установленного в отдельной ячейке, которая связана с ПТП с помощью кабеля. Протяженность кабеля может изменяться от 20 до 2000 м. Средства защиты от коммутационных перенапряжений (КП) установлены в ячейке выключателя. В качестве средств защиты используются нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН).

Вторая схема коммутации силовых трансформаторов ПТП отличается от первой тем, что ячейка с вакуумным выключателем напрямую подключается к силовому трансформатору. В качестве средств защиты от КП используются ОПН или RC -цепи.

Если коммутация силовых трансформаторов осуществляется по первой схеме, то в этом случае аварийность силовых трансформаторов незначительная и не превышает 11 % от общего количества аварий, связанных с электрическим пробоем изоляции токоведущих элементов. Наиболее слабым звеном в цепи "выключатель—кабельная линия—трансформатор" являются кабель и его разделки. На долю кабеля и его разделок приходится 72 % аварийных отключений. Оставшаяся доля аварийных отключений (17 %) приходится на повреждение изоляции магистральных кабелей.



Максимальная кратность коммутационных перенапряжений для сухих трансформаторов в зависимости от мощности трансформатора и параметров RC -цепи:

1 — RC -цепь отсутствует; 2 — $R = 130$ Ом, $C = 0,1$ мкФ; 3 — $R = 100$ Ом, $C = 0,15$ мкФ; 4 — $R = 50$ Ом, $C = 0,25$ мкФ

Очевидно, что для повышения надежности системы электроснабжения 6 кВ шахты или рудника необходимо исключить кабельную линию, связывающую ячейку вакуумного выключателя с ПТП. Данное решение реализуется с помощью использования второй схемы коммутации ПТП. В качестве примера могут выступать комплексные трансформаторные подстанции взрывозащищенного типа КТСВП-УХЛ5-ВВ мощностью от 400 до 3300 кВА, выпускаемые холдингом "Энергия" (г. Новокузнецк).

Анализ аварийности ПТП, которые коммутируются вакуумными выключателями по второй схеме, показывает, что высокая аварийность силовых трансформаторов наблюдается в том случае, если в качестве средств защиты от КП используются ОПН. При использовании RC -цепей с параметрами $C = 0,1$ мкФ, $R = 130...140$ Ом в качестве средств защиты от КП силовые трансформаторы мощностью 630 кВА и более практически не выходят из строя из-за электрического пробоя изоляции. Однако трансформаторы мощностью 400 кВА и менее могут выходить из строя из-за электрических пробоев изоляции обмотки высшего напряжения, обусловленных КП.

На рисунке приведены результаты экспериментальных исследований, отражающие влияние мощности сухого трансформатора и параметров RC -цепи на величину КП (максимальная кратность k_{max}), возникающую на вводе трансформатора при отключении его от сети 6 кВ вакуумным выключателем на холостом ходу.

Группой исследователей под руководством профессоров И.Я. Эпштейна и А.Ф. Гончарова было доказано, что для трансформаторов со сроком эксплуатации более 5 лет допустимая кратность КП составляет 2,8. В противном случае КП могут привести к электрическому пробое изоляции обмотки трансформатора [1, 2].

Анализ зависимостей, представленных на рисунке с учетом допустимой кратности КП, показывает, что сухие трансформаторы мощностью до 2500 кВА включительно необходимо эксплуатировать со средствами защиты от КП, так как максимальная кратность КП превышает допустимый уровень. Использование RC -цепей, собранных по схеме "звезда с заземленной нейтральной точкой", с параметрами $R = 130$ Ом, $C = 0,1$ мкФ, обеспечит безопасную эксплуатацию сухих трансформаторов, если мощность трансформатора будет 500 кВА и более, а для трансформаторов мощностью 400 и 250 кВА кратность КП может достигать значений, соответственно равных 2,9 и 3,1, что выше допустимого уровня. Следовательно,

возможен электрический пробой изоляции обмотки высшего напряжения из-за КП.

Для обеспечения безопасной эксплуатации сухих трансформаторов мощностью 400 кВА и менее необходимо, чтобы параметры RC -цепи составляли $R = 100 \text{ Ом}$, $C = 0,15 \text{ мкФ}$. В этом случае кратность КП не будет превышать 2,7. Для более глубокого ограничения КП параметры RC -цепи должны быть равны $R = 50 \text{ Ом}$, $C = 0,25 \text{ мкФ}$, что позволит ограничить кратность КП до двукратного значения.

Однако при выборе RC -цепей необходимо обращать внимание, как влияют параметры RC -цепей на величину и характер тока однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) в сетях 6 кВ шахт и рудников.

Если параметры RC -цепей будут соответственно равны $R = 130 \text{ Ом}$, $C = 0,1 \text{ мкФ}$; $R = 100 \text{ Ом}$, $C = 0,15 \text{ мкФ}$; $R = 50 \text{ Ом}$, $C = 0,25 \text{ мкФ}$, тогда одна RC -цепь в трехфазном исполнении, собранная по схеме "звезда с заземленной нейтральной точкой", будет увеличивать емкостной ток ОЗЗ соответственно на 0,33, 0,5 и 0,83 А, так как имеет электрическую связь с контуром заземления.

Современные шахты и рудники имеют разветвленную распределительную сеть напряжением 6 кВ. Например, от одной секции шин ЦПП-6кВ на рудниках ОАО "Уралкалий" может быть запитано до 25 передвижных трансформаторных подстанций. В этом случае при использовании RC -цепей для эффективной защиты силовых трансформаторов от КП ток ОЗЗ возрастет на 12,5...20,7 А, что может привести к необходимости использования дугогасящих реакторов или увеличению мощности реакторов, предназначенных для компенсации емкостных токов ОЗЗ.

Отметим, что ограничение КП с помощью RC -цепей достигается за счет уменьшения волнового сопротивления силового трансформатора, что приводит к снижению амплитуды и частоты коммутационного импульса и вероятности возникновения повторных зажигания дуги в вакуумной камере выключателя.

Данный процесс ограничения КП хорошо описывается с помощью простых формул

$$U_{к.и} = i_0 \sqrt{\frac{L}{C}}; f_{к.и} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

где $U_{к.и}$ — амплитуда коммутационного импульса при отключении трансформатора, В; $f_{к.и}$ — частота коммутационного импульса, Гц; i_0 — срез тока, А; L — индуктивность обмоток трансформатора, Гн; C — емкость обмоток

трансформатора по отношению к земле с учетом емкости RC -цепи.

Очевидно, что увеличение емкости обмоток трансформатора по отношению к земле за счет емкости RC -цепей приводит к ограничению КП из-за снижения $U_{к.и}$ и $f_{к.и}$.

Авторы данной статьи предлагают для ограничения КП более эффективный способ, связанный с уменьшением тока холостого хода трансформатора.

Эксперименты показали, что максимальные КП возникают при отключении трансформаторов на холостом ходу. В этом случае ток холостого хода имеет в основном индуктивный характер, так как активная составляющая тока холостого хода не превышает 10 % [3].

Очевидно, что полная компенсация индуктивного тока холостого хода трансформатора может быть достигнута за счет подключения к обмотке низшего напряжения конденсаторов или RC -цепей, собранных по схеме "треугольник", что приведет к существенному снижению тока среза, так как ток, протекаемый через контакты вакуумного выключателя, будет близок к нулю.

Эксперименты показали, что КП снижается в 4–4,5 раза, при этом кратность КП будет не более 1,45, если емкость конденсаторов определяется по формуле

$$C = \frac{I_{х.х} k_T}{550 \cdot U_{н.н}}, \text{ мкФ},$$

где $I_{х.х}$ — ток холостого хода, А; k_T — коэффициент трансформации; $U_{н.н}$ — номинальное напряжение обмотки низшего напряжения, В.

Например, для сухих трансформаторов мощностью 400 и 630 кВА емкость конденсатора составит соответственно 40 и 34 мкФ.

Использование данного способа ограничения КП позволяет не только снизить кратность КП до уровня 1,45, но и исключить влияние конденсаторов или RC -цепей на величину и характер тока ОЗЗ, так как конденсаторы или RC -цепи, собранные по схеме "треугольник", не связаны электрически с контуром замыкания.

Список литературы

1. Эпштейн И.Я. Перенапряжения при коммутации электропечных трансформаторных агрегатов вакуумными выключателями / И.Я. Эпштейн, А.Ф. Гончаров, Ю.Н. Попов, С.В. Кузьмин // Электротехника. 1990. № 4. С. 68–71.
2. Гончаров А.Ф. Испытание вакуумных выключателей на коммутационные перенапряжения / А.Ф. Гончаров, И.Я. Эпштейн // Добыча угля открытым способом. 1982. № 5. С. 36–37.
3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины / А.В. Иванов-Смоленский. М.: Энергия, 1980. 928 с.