

УДК 621.316

## ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ D-STATCOM

Хасанова А.С., магистрант гр. ЭПм-191, II курс  
Воронин В.А., старший преподаватель  
Непша Ф.С., к.т.н., старший научный сотрудник  
Кузбасский государственный технический университет  
имени Т.Ф. Горбачева  
г. Кемерово

В связи с широким распространением возобновляемых источников энергии в последние десять лет наблюдается общая тенденция к снижению потребления угля: потребление угля в Евросоюзе сократилось на 15%, а в США – на 17%. Причиной стал отказ энергетических компаний от тепловых электростанций, работающих на угле, и ставка на возобновляемые источники энергии из-за постоянно ужесточающихся экологических стандартов в развитых странах.

Однако Россия и Китай продолжают широко использовать уголь. В связи с этим необходимо постоянное развитие технологий и повышение эффективности угледобычи. Требуется постепенная реализация концепции «Индустрия-4.0» в угольную промышленность.

С этой целью в программе развития угольной промышленности России до 2035 г. [1] предусматривается модернизация и техническое перевооружение угледобывающих предприятий с внедрением цифровых технологий в процессах добычи и переработки угля.

Необходимо отметить, что удельный расход электроэнергии может достигать до 25% от себестоимости добычи угля [2]. За последние годы энерговооруженность забойного оборудования существенно увеличилась. Установленная мощность электрооборудования в очистном забое достигает 1500-2000 кВт, а мощность отдельных двигателей забойных машин превышает 400-600 кВт [3]. Горное оборудование работает в тяжелых условиях с частыми пусками и влиянием множества случайных факторов на электрическую нагрузку, что приводит к снижению энергоэффективности подземных систем электроснабжения.

В настоящее время существует множество устройств, позволяющих сгладить колебания электрических нагрузок, повысить коэффициент мощности, устранить несинусоидальность напряжения. К таким устройствам могут быть отнесены устройства технологии гибкой системы передачи переменного тока – FACTS. Они позволяют осуществлять быстродействующую компенсацию реактивной мощности и фильтрацию высших гармоник тока. Такие устройства могут обладать высокой эффективностью в тяжелой электромагнитной

обстановке электротехнического комплекса выемочных участках угольных шахт.

Необходимо отметить, что проблема внедрения технологий интеллектуального управления потоками электроэнергии и мощности в угольные шахты недостаточно освещена в литературе. В связи с этим требуется разработка методологических подходов выбора параметров и мест установки устройств FACTS в системах электроснабжения угольных шахт. На рис. 1 представлена схема со структурными компонентами D-STATCOM.

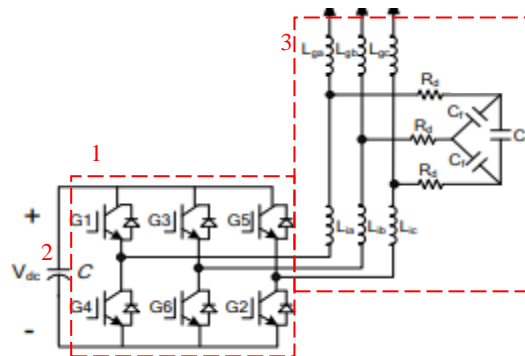


Рис. 1 Схема, иллюстрирующая структурные компоненты D-STATCOM

В силовую структурную схему D-STATCOM входят элементы:

1) Инвертор напряжения (рис. 1, поз. 1).

Схема инвертора преобразует постоянный ток в переменный. Инвертор напряжения запитывается конденсатором на входе. Затем инвертор подключается параллельно к распределительной линии через интерфейсный фильтр (LCL), как показано на рис 1. LCL устанавливает связь между VSI и энергосистемой [4].

Инвертор источника напряжения, используемый в D-STATCOM, осуществляет управление гармониками. Конденсатор постоянного тока в инверторе используется в качестве источника питания, который при высокой частоте генерирует сигнал, устраняющий гармоники, создаваемые нелинейной нагрузкой. Подавления гармоник в форме волны тока достигается с помощью VSI и интерфейсного фильтра. С помощью инвертора интерфейсный фильтр преобразует созданный сигнал напряжения в токовый сигнал. Желаемая форма волны получается путем точного управления переключателя в инверторе. Текущая форма волны зависит от частоты переключения инвертора и от управляющего напряжения интерфейсного фильтра. Входное напряжение интерфейсного фильтра определяет максимальное  $di/dt$ , которое может быть выдано фильтром. Это важно, потому что относительно высокие значения  $di/dt$  необходимы для подавления гармоник более высокого порядка [4].

Инвертор позволяет в широких пределах регулировать выходной ток, изменяя не только его величину и фазу, но также и форму. Напряжение инвертора зависит от напряжения на накопительных конденсаторах и подаваемого сигнала управления. Для каждой фазы данный сигнал представляет собой

синусоиду, синхронизированную с напряжением сети имеющую амплитуду до 1 ед., что соответствует максимальному выходному напряжению инвертора. Если напряжение инвертора выше напряжения сети, ток будет иметь ёмкостной характер, если ниже - индуктивный. Для формирования активного тока напряжение инвертора сдвигают по фазе. В идеальном случае выходное напряжение инвертора должно повторять форму этого сигнала. В работе [5] приведен порядок расчета параметров инвертера.

2) Конденсатор звена постоянного тока (рис. 1, поз. 2).

Конденсатор постоянного тока обеспечивает постоянное напряжение промежуточного контура. Выходное напряжение D-STATCOM генерируется VSI (автономный инвертер напряжения) работающим от конденсатора промежуточного контура. Конденсатор промежуточного контура воздействует на гармонические искажения на выходе напряжение, генерируемого D-STATCOM, а также на скорость реакции контроллера. При малоразмерном конденсаторе ответ контроллера будет быстрым, но напряжение промежуточного контура будет иметь высокую пульсацию и следовательно, выходное напряжение будет содержать высокий уровень гармонических искажений. Более того, будут иметь место высокие кратковременные выбросы. С другой стороны, конденсатор увеличенного размера улучшит выход форма волны напряжения и уменьшит переходные процессы за счет продолжительного ответа контроллера.

Согласно приведенному выше анализу, опираясь на источник [4], выбор напряжение конденсатора ( $V_{dcref}$ ) и емкость конденсатора  $C_{dc}$  может быть определена из (1) и (2):

$$V_{dcref} = \frac{2\sqrt{2}V_{LL}}{\sqrt{3}m_a} \quad (1)$$

$$C_{dc} = \frac{2S_n nT}{(1,8V_m)^2 - (1,4V_m)^2} \quad (2)$$

где -  $V_{dcref}$  эталонное напряжение конденсатора,  $V_{LL}$  - линейное напряжение сети,  $m_a$  - это индекс модуляции,  $C_{dc}$  - величина емкости конденсатора постоянного тока,  $V_m$  - пиковое значение сетевого напряжения,  $S_n$  - номинальная мощность системы,  $T$  - период времени системы,  $n$  - цикл вот и начинает работать контроллер.

В работе [5] приведены следующие формулы для определения емкости конденсатора:

$$C = \frac{q}{U} \quad (3)$$

$$q = C \cdot U \quad (4)$$

$$q = \int_{t_1}^{t_2} I_C \cdot dt \quad (5)$$

Источник [6] определяет значение емкости определяется с помощью (6):

$$C = \frac{v_{out-peak} \cdot i_{n-peak}}{4\pi \cdot f_G \cdot v_{DC} \cdot \Delta v_C} \quad (6)$$

где  $v_{out-peak}$  - выходное напряжение пик,  $i_{n-peak}$  - пиковый ток нейтрали,  $f_G$  - частота сети и  $\Delta v_C$  - напряжение пульсации.

3) Схема выходного фильтра инвертора представлена на рис. 2

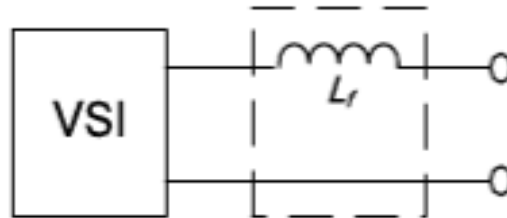


Рис. 2 Принципиальная схема L-фильтра

L-фильтр - это фильтр первого порядка с затуханием 20 дБ/дек во всем диапазоне частот. Индуктор L-фильтра первого порядка популярен и прост в использовании, имеет низкое затухание и высокое значение индуктивности. Минусом данной системы является падение напряжения на катушке индуктивности, что в свою очередь, вызывает длительный отклик. При использовании L-фильтра частота коммутации инвертора должен иметь высокое значение, чтобы достаточно ослаблять гармоники. Пиковый ток пульсации является критерием выбора индуктора. Для расчета пульсации рассматривается текущее состояние холостого хода при незначительном влиянии сопротивления индуктора. При этом условии опорное напряжение инвертора равно напряжению питания. Таким образом, требуемая сглаживающая индуктивность определяется выражением[4]:

$$L_f = \frac{V_{dc}}{6f_{sw} \Delta_{ph(p-p)max}} \quad (7)$$

где  $\Delta_{ph(p-p)max} = 15\%$  компенсации пикового тока,  $V_{dc}$  - это напряжение питания инвертора,  $f_{sw}$  - частота коммутации.

В источнике [5] представлена аналогичная формула:

$$L = \frac{1}{n} \cdot \frac{V_{dc}}{\Delta i_L \cdot f_{sw}} \quad (8)$$

4) LCL-фильтр (рис. 1, поз. 3).

Ослабление LCL-фильтра составляет 60 дБ/дек для частот выше резонансной. Поэтому для переключения инвертора можно использовать более низкую частоту. Высокая частота гармоник напряжения и тока, генерируемое высокочастотное переключение в VSI, может подавляться использованием LCL-фильтра. LCL фильтр состоит из двух последовательно соединенных катушек индуктивности и конденсатора шунтирования между ними. По сравнению с

фильтром с использованием одного дросселя, с помощью LCL-фильтра можно увеличить частоту переключения. Общая индуктивность фильтра должна быть не меньше необходимой для реализации быстрого отслеживания и высокой динамики, а так же должна справляться с колебаниями тока. Рассмотрим подключение LCL-фильтра по схеме «треугольник» и «звезда». Пусть индуктивности и емкости одинаковы для двух схем, резонансная частота LCL-фильтра, подключенного треугольником, уменьшается в 3 раза относительно резонансной частоты LCL фильтра, соединенного звездой. А так же при использовании схемы треугольник наблюдается снижение токовых гармоник. Поскольку частота коммутации ниже на несколько килогерц гармоники вызывают искажение управляющих сигналов инвертора. Управлять инвертором удобнее с LCL фильтром подключенным треугольником, потому что при соединении в звезду гармонические составляющие тока имеют большую величину[4].

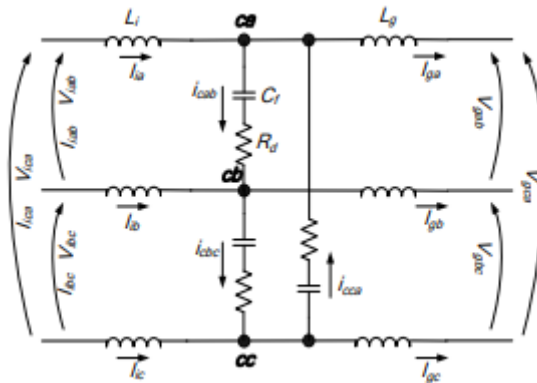


Рис. 3 Принципиальная схема LCL-фильтра

Расчет параметров индукторов в LCL-фильтр основан на следующем принципе: падение напряжения на индукторах LCL фильтра должно быть менее 10% фазного напряжения сети [4]:

$$\omega(L_i + L_g)I_n < \frac{10\% \cdot U_n}{\sqrt{3}} \text{ мГн} \quad (9)$$

Чтобы ограничить ток короткого замыкания и токовые гармоники, индуктивность катушек индуктивности должна быть не ниже определенных значений. Минимальное значение индуктивности определяется током пульсаций, который выбирается между 10% -20%.

$$20\% \cdot 8 \cdot (L_i + L_g)I_n f_{sw} \geq V_{DC} \text{ мГн} \quad (10)$$

Чтобы гарантировать эффективность D-STATCOM, реактивная мощность, поглощаемая фильтром конденсатора должны быть менее 5% от номинальной емкости.

Демпфирующее сопротивление: эквивалентное сопротивление пассивного LCL-фильтра на резонансной частоте близко к нулю в результате чего снижается запас устойчивости системы. Чтобы сохранить устойчивость, последовательно используется резистор  $R_d$  с конденсатором. Сопротивление  $R_d$  обыч-

но выбирается пропорционально емкостному сопротивлению фильтра на резонансной частоте ( $\frac{1}{3 \cdot 2\pi f_{\text{res}} C}$ ). Это сопротивление выбирается так, чтобы минимизировать рассеяние мощности.

В данной статье рассмотрены устройства D-STATCOM, предназначенные для динамической компенсации реактивной мощности, фильтрации высших гармоник и симметрированию нагрузки. Представлена структура данного устройства и приведены основные подходы к выбору его параметров.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых № МК-236.2020.8.

### Список литературы:

1. Распоряжение Правительства РФ от 13.06.2020 N 1582-р Об утверждении Программы развития угольной промышленности России на период до 2035 года // СПС КонсультантПлюс URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_355241/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_355241/) (дата обращения: 14.03.2021)
2. Плакиткин Ю.А. Мировой инновационный проект «Индустрия-4. 0» - возможности применения в угольной отрасли России. 2. Что «Требует» от угольной отрасли четвертая промышленная революция? / Ю.А. Плакиткин, Л.С. Плакиткина // Уголь. – 2017. – №11 (1100). – С. 46-53
3. Шкарабег Ф.П. Электроснабжение подземных потребителей глубоких и энергоемких шахт / Ф.П. Шкарабег // Горные науки и технологии, 2017. – №3. – С. 25-42
4. Teke A. Step by Step Design Procedure of a Distribution Static Synchronous Compensator (DSTATCOM) /A. Teke, Y. Yoldas, M. Latran // Çukurova University Journal of Engineering and Architecture Faculty, 30 (1), June 2015 – С.117-131
5. Ненахов А.И. Разработка методик подавления колебаний напряжения и коррекции формы токов резкопеременных промышленных нагрузок с помощью быстродействующих управляемых устройств / А.И. Ненахов // МЭИ, Москва, 2017 - С. 70-96
6. Benavides-Córdoba, S Implementation of a Distribution Static Compensator D-STATCOM: Hardware and Firmware Description / S. Benavides-Córdoba, J.R. Ortiz-Castrillón, N. Muñoz-Galeano, J.B. Cano-Quintero, J.M. López-Lezama // Scientia et Technica Año XXIV, Vol. 24, No. 04,. Universidad Tecnológica de Pereira - diciembre de 2019 – С. 552-565