

А.Г. СОСКОВ, д-р техн. наук,
Н.О. РАК, аспирант

ГИБРИДНЫЙ КОНТАКТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА С УЛУЧШЕННЫМИ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Запропоновані нові принципи побудови гібридних контакторів постійного струму, які дозволяють створювати апарати, що за техніко-економічними показниками істотно перевершують аналогічні вироби.

Предложены новые принципы построения гибридных контакторов постоянного тока, позволяющие создавать аппараты, существенно превосходящие по технико-экономическим показателям аналогичные изделия.

Гибридные контакторы сочетают положительные качества как контактных аппаратов (малые потери мощности во включённом состоянии), так и бесконтактных (бездуговая коммутация цепи). В этих аппаратах параллельно главным контактам (ГК) подключен силовой полупроводниковый ключ (ПК), который обеспечивает бездуговую коммутацию контактов при их размыкании. Во включённом состоянии аппарата силовой ПК зашунтирован ГК. Принцип коммутации, как и для контакторов переменного тока, состоит в переводе тока из цепи контакторов во вспомогательную параллельную цепь и последующее прерывание тока. В связи с необходимостью принудительного прерывания тока во вспомогательной цепи силовые схемы и схемы их управления более многообразны и сложны по сравнению с контакторами переменного тока.

Будущее развитие гибридных контакторов постоянного тока связано с освоением силовых полностью управляемых приборов на номинальные токи до 1000 А и напряжение до 1500 В и существенным снижением их стоимости, а также с улучшением защитных характеристик варисторов.

Гибридные контакторы постоянного тока наиболее тяжёлых категорий применения DC-4 и DC-5 должны в режиме нормальных коммутаций включать и отключать токи до $2,5 I_{ном.р.}$ при $U_{ном.р.}$ и постоянной времени T до 10 мс, в режиме редких коммутаций до $4 I_{ном.р.}$ при $1,1 U_{ном.р.}$ и $T=15$ мс [1]. Указанные режимы имеют место при включении и отключении заторможенных или медленно вращающихся электродвигателей переменного и постоянного тока, а также при их торможении противотоком.

Анализ принципов построения гибридных контакторов постоянного тока. Современные гибридные контакторы постоянного тока содержат следующие узлы [2]:

- главные контакты;
- силовой ПК, шунтирующий главные контакты контактора. В момент

размыкания ток из них переходит в цепь тиристора, чем обеспечивается практически бездуговое размыкание контактов (на ГК имеет место короткая дуга в течение времени перетекания тока из их цепи в *VSI*, которое измеряется десятками микросекунд);

- устройство емкостной принудительной коммутации, которое предназначено для выключения основного тиристора;
- блок управления силовым ПК;
- демпфирующую цепь, которая ограничивает скорость нарастания напряжения на полупроводниковых приборах при подаче напряжения на силовую цепь контактора;
- диод, шунтирующий цепь нагрузки и исключаяющий влияние индуктивности нагрузки на цепь коммутации.

Эти контакторы обеспечивают практически бездуговую коммутацию главных контактов как при включении, так и при выключении контактора, а также гальваническую развязку между сетью и нагрузкой. Однако им свойственны следующие недостатки:

- невозможность применения в реверсивных схемах включения;
- большие габариты устройства принудительной коммутации основного тиристора;
- большая масса и высокая стоимость из-за использования в качестве коммутирующего конденсатора дорогого неполярного конденсатора большой емкости;
- наличие дополнительного узла (зарядной цепи), который обеспечивает предварительный заряд коммутирующего конденсатора;
- высокий уровень коммутационных перенапряжений из-за рассеивания энергии, накопленной в индуктивности сети;
- коммутирующий конденсатор находится под напряжением сети на протяжении всего времени включенного состояния контактора.

Указанные недостатки обусловили основные проблемы, которые необходимо решать при разработке гибридных контакторов постоянного тока:

- снижение массы, габаритов и стоимости ПК как основного узла, определяющего эти показатели для контактора в целом;
- обеспечение надёжного контакта в цепи ГК при включении контактора;
- создание ПК с узлом принудительной коммутации основного тиристора, использующим наиболее рациональное использование энергии, запасённой в коммутирующем конденсаторе, для выключения указанного тиристора;
- обеспечение предварительного заряда коммутирующего конденсатора без применения дополнительного источника питания;
- создание высоконадёжных СУ с управлением током, протекающим по цепи ГК, и без использования для их питания дополнительных источников;
- обеспечение приемлемого для низковольтных цепей постоянного тока уровня перенапряжений в диапазоне токов, коммутируемых контактором.

В настоящее время эти проблемы наиболее полно решены в гибридных контакторах постоянного тока серии КП81 на номинальные токи 100 – 630 А

и напряжение 220 В.

В этой связи разработку гибридных контакторов постоянного тока с улучшенными техническими характеристиками целесообразно вести на базе ПК, в которых в качестве СПП применяется полностью управляемый полупроводниковый прибор (IGBT-транзистор либо двухоперационный тиристор). Это позволит исключить недостатки, присущие схемам емкостной принудительной коммутации ранее используемых однооперационных тиристоров, с одной стороны, а достигнутые высокие технические характеристики полностью управляемых СПП, их приемлемая цена и доступность на мировом рынке электронной продукции, с другой, создают реальные предпосылки для создания гибридных контакторов, в которых будут максимально устранены сформулированные выше недостатки.

Результаты разработки гибридных контакторов с улучшенными характеристиками. В Харьковской национальной академии городского хозяйства на кафедре теоретической и общей электротехники в рамках государственной тематики авторами работы были разработаны схемы гибридных контакторов постоянного тока, выполненные на основе изобретения [3], в которых в основном устранены приведенные выше недостатки существующих схем.

На рис. 1, а представлена электрическая первого варианта гибридного контактора постоянного тока, выполненного на базе двухоперационного тиристора (рис. 1, а) и второго варианта – на базе IGBT-транзистора (рис. 1, б), используемого в качестве силового ПК.

Гибридный двухполюсный контактор постоянного тока содержит в каждом полюсе по одному главному контакту ГК1 и ГК2, причем растворы этих контактов отрегулированы таким образом, что второй главный контакт ГК2 размыкается после размыкания первого (время задержки составляет 7-9 мс), полностью управляемый ПК, например, двухоперационный тиристор VS1 или IGBT-транзистор VT1, включенный параллельно реле тока Р и первому главному контакту ГК1, а реле тока Р включено последовательно с главным контактом ГК1, устройство принудительной коммутации, которое состоит из коммутирующего тиристора VS2, коммутирующего конденсатора С3 и ограничивающего резистора R4, элемент задержки времени, который состоит из резистора R3 и конденсатора С4, и пороговый элемент VD3, в контактор дополнительно введены конденсатор С2 и ограничитель напряжения VD2, включенные параллельно входной цепи полностью управляемого ПК VT1 (рис. 1, а) или VS1 (рис. 1, б), диод VD1, резистор R2, зарядный резистор R6, второй замыкающий контакт К2 реле тока Р, включенный параллельно конденсатору С4 элемента задержки времени, транзисторный ключ VT2, ограничитель перенапряжений R5, подключенный между входным зажимом первого полюса и выходным зажимом второго полюса контактора, и оптронный тиристор VD4, включенный между выходными зажимами контактора, при этом входная цепь полностью управляемого ПК VT1 (рис. 1, а) или VS1 (рис. 1, б) через замыкающий контакт К1 реле тока Р, диод VD1 и резистор R2 подключены параллельно главному контакту ГК1, а через ограничивающий резистор R4, входную цепь оптронного тиристора VD4 и коммутирующий тиристор

VS2 – параллельно коммутирующему конденсатору C3, катод же коммутирующего тиристора VS2 через зарядный резистор R6 подключен за главным контактом GK2 к аноду оптронного тиристора VD4, параллельно коммутирующему конденсатору C3 также подключен элемент задержки времени, конденсатор C4 которого через пороговый элемент VD3 подключен ко входной цепи транзисторного ключа VT2, а его выходная цепь через управляющую цепь коммутирующего тиристора VS2 подключена к коммутирующему конденсатору C3.

На рис. 1, а и рис. 1, б элементы аппарата GK1, GK2, VT1 (рис. 1, а) или VS1 (рис. 1, б), P образуют главную цепь аппарата, элементы C2, VD2, VD1, R2, K1 – цепь управления включением полностью управляемым ПК, а элементы VS2, R4, VT2, VD3, R3, C3, C4, K2 – цепь управления выключением полностью управляемого ПК. В качестве контактов K1 и K2 реле тока P использованы магнитоуправляемые герметичные контакты (герконы).

В отключенном состоянии аппарата главные контакты GK1 и GK2 разомкнуты и все его элементы обесточены.

При включении аппарата при замыкании главных контактов GK1 и GK2 и протекании тока в главной цепи (цепи, содержащей главные контакты) реле тока P срабатывает и его контакты K1 и K2 замыкаются. Коммутирующий конденсатор C3 устройства принудительной коммутации через зарядный резистор R6 с малым сопротивлением быстро заряжается практически до напряжения сети. Большая величина сопротивления резистора R3 элемента задержки времени обеспечивает малый ток, и следовательно малую мощность, потребляемую цепями управления полностью управляемым ПК во включенном состоянии контактора. В этом состоянии, когда главный контакт GK1 замкнут, VT1 (рис. 1, а) или VS1 (рис. 1, б) обесточен, поскольку значение падения напряжения на замкнутых главных контактах GK1 во всем диапазоне рабочих токов контактора не превышает 0,5 В, то есть управляющий сигнал на включение полностью управляемого ПК отсутствует.

При выключении аппарата при размыкании главного контакта GK1 на нем возникает короткая дуга, в результате чего происходит резкий рост падения напряжения на нем, под действием которого через резистор R2 и диод VD1 происходит включение полностью управляемого ПК, в результате чего он переходит в полностью включенное состояние.

Ток из цепи главного контакта GK1 и реле тока P переходит в цепь полностью управляемого ПК. При полном перетекании тока из цепи главного контакта GK1 реле тока P выключается, его контакты K1 и K2 размыкаются и цепь управления полностью управляемым ПК обесточивается.

Максимальное прямое падение напряжения на открытом полностью управляемом ПК не более 1,5-3,5 В, что является недостаточным для возникновения дуги на главном контакте GK1. Следует отметить, что в момент перехода тока из цепи главных контактов из-за наличия индуктивности в цепи коммутации (главные контакты вместе с полностью управляемым ПК) возникает короткая дуга, однако этот процесс из-за малого значения указанной индуктивности продолжается несколько десятков микросекунд и поэтому не

имеет существенного влияния на коммутационную износостойкость главных контактов.

При горении короткой дуги на главном контакте ГК1 контакты К1 и К2 реле тока Р остаются замкнутыми и размыкаются только после полного протекания коммутируемого тока из главной цепи в шунтирующую цепь (цепь полностью управляемого ПК). Длительность протекания тока нагрузки через полностью управляемый ПК обеспечивается элементом задержки времени и составляет около 3 мс, что вполне достаточно для размыкания главных контактов ГК1 на расстояние, безопасное для электрического пробоя контактного промежутка. Главный контакт ГК2 при этом еще остается замкнутым.

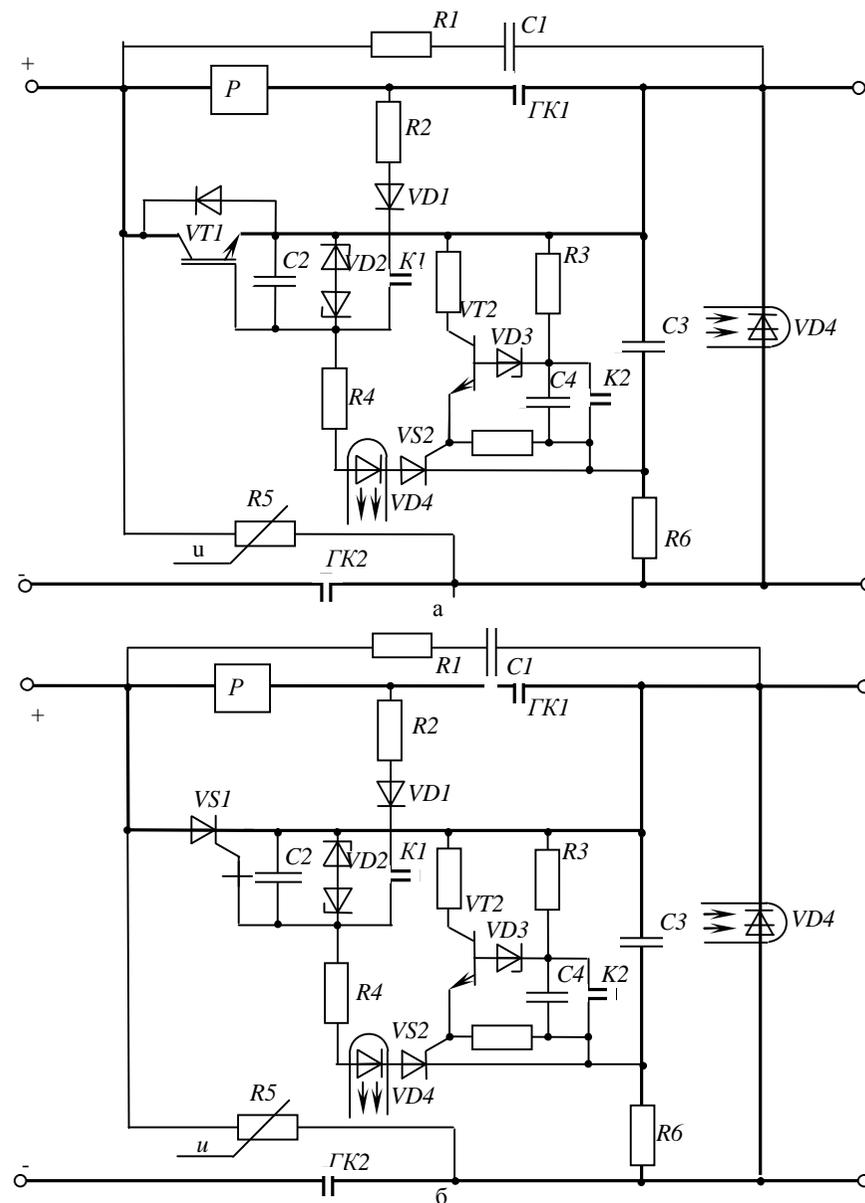


Рис. 1. Электрическая схема варианта гибридного контактора постоянного тока: а) выполненного на базе IGBT-транзистора; б) выполненного на базе двухоперационного тиристора

Для поддержания в открытом состоянии IGBT-транзистора (рис. 1, а) на это время применяется дополнительно введенный конденсатор $C2$, включенный параллельно входной цепи полностью управляемого ПК $VT1$. Напряже-

ния, до которого был заряжен этот конденсатор в промежуток времени, когда на главных контактах ГК1 существует короткая дуга, достаточно для поддержания полностью управляемого ПК во включенном состоянии в течение вышеупомянутых 3 мс. Диод VD1 не позволяет разрядиться конденсатору C2 через резистор R2 и открывает полностью управляемый ПК VT1 в этот промежуток времени. Без этого конденсатора IGBT-транзистор работал бы в активном режиме и на нем выделялась бы значительная мощность. В отличие от IGBT-транзистора двухоперационный тиристор VS1, применяемый в качестве полностью управляемого ПК (рис. 1, б), при получении управляющего сигнала на включение автоматически остается в полностью открытом состоянии.

Полное выключение коммутируемой цепи происходит после полного перетекания тока из главной цепи в шунтирующую и расхождение главных контактов 1 на расстояние, безопасное для электрического пробоя контактного промежутка, после чего полностью управляемый ПК размыкается. Поскольку главный контакт ГК2 отрегулирован таким образом, что его размыкание произойдет через 7-9 мс позже размыкания главного контакта ГК1, он размыкается без дуги. После размыкания главного контакта ГК2 обеспечивается гальваническая развязка сети и нагрузки, а контактор полностью обесточивается.

Для исключения влияния индуктивности нагрузки на контактор в схемах применяется оптронный тиристор VD4, шунтирующий цепь нагрузки при выключении полностью управляемого ПК VT1 (рис. 1, а) или VS1 (рис. 1, б). Применение оптронного тиристора вместо диода, шунтирующего нагрузку, позволяет применять предлагаемый контактор в реверсивных схемах включения. Для снижения влияния энергии, накопленной в индуктивности сети при прерывании тока нагрузки и предотвращения возникновения перенапряжений на контакторе в схему введен ограничитель перенапряжений R5, который тоже срабатывает при выключении полностью управляемого ПК.

При вибрациях главных контактов ГК1 полностью управляемый ПК включается аналогично тому, как это описано для случая отключения контактора. Однако, конденсатор C4 элемента задержки времени за время отскока главных контактов не успевает зарядиться до напряжения, необходимого для пробоя порогового элемента VD3, управляющего подачей запирающего сигнала на полностью управляемый ПК. Таким образом, устройство принудительной коммутации при вибрациях главных контактов не работает.

Предлагаемый гибридный двухполюсный контактор постоянного тока имеет повышенный срок службы и повышенную надежность работы за счет того, что в качестве силового ПК, шунтирующего главные контакты контактора в момент их размыкания, использован полностью управляемый полупроводниковый прибор, например, двухоперационный тиристор или IGBT-транзистор, контактор имеет значительно уменьшенные габариты, массу и стоимость из-за упрощения схемы управления этими приборами, а также за счет схемного решения в качестве коммутирующего конденсатора использован полярный (электролитический) конденсатор с небольшой емкостью, в результате чего существенно снижаются габариты, масса и стоимость контак-

тора, также в предлагаемом контакторе снижен уровень перенапряжений за счет введения ограничителя перенапряжений, предлагаемый контактор обеспечивает гальваническую развязку сети и нагрузки.

Так же предлагаемый гибридный двухполюсный контактор постоянного тока обеспечивает отсутствие зоны коммутации с дугой как при включении, так и при выключении аппарата, его работа не зависит от типа привода, который обеспечивает коммутацию контактной системы аппарата, поэтому он может применяться как аппарат управления, так и защиты. В сравнении с существующими аппаратами этого типа за счет предложенных схемных решений и экономного режима работы комплектующих у него уменьшены габариты и стоимость и повышена надежность его работы.

Схему гибридного контактора на рис. 1, а с использованием IGBT-транзистора в качестве полностью управляемого ПК целесообразно использовать при коммутации токов до 500-600 А, то есть для контакторов на номинальные токи ($I_{ном}$) до 160 А, из-за того, что они, рассчитанные на большие токи ещё не выпускаются массово, а если выпускаются, то имеют большую стоимость. В отличие от этих приборов двухоперационные тиристоры выпускаются преимущественно для работы в цепях с большими токами ($I_{ном} > 160$ А), что и определяет область использования схемы на рис. 1, а – исходя из того, что в схеме на рис. 1, а целесообразным является использование коммутирующего конденсатора с ёмкостью 1-2 мкФ, а в схеме на рис. 1, б значительно большей ёмкости, контактор на рис. 1, а следует использовать в случаях, когда решающую роль играют массогабаритные показатели контактора.

Выводы. 1. Предлагаемые гибридные контакторы постоянного тока:

- обеспечивают практически бездуговую коммутацию цепи как при включении аппарата, так и при его выключении;
- позволяют применять контакторы в реверсивных схемах включения;
- имеют значительно повышенную надежность работы из-за упрощения схемы управления полностью управляемым СПП.

2. В предлагаемых контакторах:

- снижены масса, габариты и стоимость ПК как основного узла, определяющего эти показатели для контактора в целом;
- узел принудительной коммутации силового ПК обеспечивает наиболее рациональное использование энергии, запасённой в коммутирующем конденсаторе, для выключения тиристора;
- предварительный заряд коммутирующего конденсатора обеспечивается без применения дополнительного источника питания;
- силовой ПК управляется током, протекающим по цепи ГК без использования дополнительных источников питания.

3. Предложенные схемы обеспечивают приемлемый для низковольтных цепей постоянного тока уровень перенапряжений в диапазоне токов, коммутируемых контактором.

4. Гибридные контакторы, выполненные на базе IGBT-транзистора, целесообразно использовать на номинальные токи до 160 А, а выполненные на базе двухоперационного тиристора – на номинальные токи свыше 160 А.

5. Эти аппараты целесообразно использовать в тяжёлых режимах эксплуатации, например, при частых пусках электродвигателей, в условиях повышенных требований пожаро- и взрывобезопасности, например, в электрическом транспорте.

Список литературы: 1. ДСТУ 2846-94. Контактори електромагнітні низковольтні. Загальні технічні умови. 2. Сосков А.Г., Соскова И.А. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита – К: Каравела, 2005 – 344 с. 3. Пат. 33171 Україна. МКИ Н 01 Н 9/30, Н 01 Н 9/54. Гібридний двополюсний контактор постійного струму / А.Г. Сосков, Н.О. Рак, Соскова И.О. – № u2008 01870; Заявлено 13.02.2008; Опубл. 10.06.2008. Бюл. № 11. – 8 с.

Поступила в редколлегию 29.09.08