



СИЛОВЫЕ ПЛЕНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ В ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКАХ ЭНЕРГИИ

Джон Галлипо (John Gallipeau), AVX
Перевод: Владимир Рентюк



Усовершенствованные силовые пленочные конденсаторы серии FFLC от компании AVX идеально подходят для высоковольтных систем возобновляемых источников энергии и интеллектуальных электросетей. Кроме того, они имеют самую высокую плотность мощности по сравнению с конкурирующими технологиями.

Благодаря постоянному прогрессу в развитии технологий в области энергетики, с начала 1990-х годов стоимость 1 кВт энергии, полученного от возобновляемых энергетических источников, значительно снизилась. Кроме того, дальнейшее совершенствование сопутствующих технологий и распространение интеллектуальных электросетей позволило возобновляемым источникам энергии начать на равных конкурировать с традиционными источниками электрической энергии, получаемой в результате сжигания ископаемых видов топлива. Основным преимуществом использования ископаемых видов топлива, таких как уголь, сырая нефть и природный газ, перед возобновляемыми источниками является то, что потенциальная энергия, которую они в себе хранят, без особых проблем может оставаться в них любое время и использоваться по мере необходимости. В отличие от них альтернативная энергия от возобновляемых источников, таких как солнечная и ветровая, не является управляемой по нашему желанию и в большой мере зависит от меняющихся условий окружающей среды. Как следствие, при использовании таких источников мы имеем спонтанные изменения мощности в сети электропитания, что, в свою очередь, может вызвать проблемы с балансом нагрузки. С целью минимизировать негативное влияние данного фактора инженеры разработали новую технологию — интеллектуальные электрические сети и конденсаторы следующего поколения, а вместе с ними и ряд передовых методов накопления и хранения энергии. Эти меры призваны помочь сбалансировать нестабильные характеристики энергоэффективности систем электропитания, использующих не наносящие вред окружающей среде альтернативные возобновляемые источники энергии, и тем самым сохранить их конкурентные преимущества. Поэтому есть надежда, что по эффективности и стоимости такие источники в один прекрасный день опередят энергию, полученную путем сжигания ископаемых видов топлива.

В общем, что касается способности накопления и отдачи энергии, то по сравнению с сопоставимыми технологиями конденсаторы имеют самую высокую удельную плотность мощности. Еще одна особенность конденсаторов заключается в том, что они способны принимать и отдавать накопленную в них энергию намного быстрее, чем аккумуляторные батареи и другие альтернативные им технологии накопления и хранения энергии. Эта особенность и делает конденсаторы наиболее эффективным решением для мгновенной компенсации мощности,

поскольку когда напряжение в электрической сети опускается ниже номинального уровня, то для сохранения надлежащего уровня мощности их можно быстро разрядить. Особенно выгодным решением для высоковольтных сетей электроснабжения считаются силовые пленочные конденсаторы. Они имеют высокую энергоэффективность, отличаются длительным сроком службы и высокой надежностью. Их характеристики мало подвержены влиянию температуры, а деградация имеет плавный, а не скачкообразный характер, так что выход из строя такого конденсатора в конце срока эксплуатации не несет резко выраженных, а тем более катастрофических последствий. Само собой разумеется, что данные приборы не имеют движущихся частей и в отличие от других устройств накопления и хранения энергии практически не требуют какого-либо технического обслуживания.

СИЛОВЫЕ ПЛЕНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Наиболее часто в применениях с высокими рабочими напряжениями используются пленочные полипропиленовые силовые конденсаторы. Причина заключается в свойстве пленки из этого материала, для которого характерна высокая электрическая прочность, малый удельный вес, высокая стабильность диэлектрической проницаемости и малый коэффициент абсорбции. Кроме того, полипропиленовые конденсаторы имеют сверхмалые диэлектрические потери (низкий тангенс угла потерь, $\tan\delta$) и в зависимости от требований могут быть выполнены либо с гладкой, либо со специально подготовленной поверхностью, улучшающей пропитку конденсаторов маслом.

Силовые пленочные конденсаторы могут быть маслonaполненными, то есть изготовленными на основе пропитанной маслом, металлизированной алюминием пленки, или выполненными по сухой технологии с использованием пленки со специально нанесенным токопроводящим рисунком (такая сегментация пленки позволяет отключать участки, поврежденные во время работы конденсатора), или из сегментированной пленки, пропитанной не содержащим свободного масла силиконом. Пропитанные маслом силовые пленочные конденсаторы обычно предназначены для применений, требующих быстрого разряда высокими токами, а также для высоковольтных цепей с напряжением постоянного или переменного тока и для схем коррекции коэффициента мощности. Сухие сегментированные пленочные конденсаторы применяются в самых различных областях,

включая, помимо прочего, приложения (применения) средней мощности, используются в качестве демпфера (снабберов) для подавления переходных процессов, возникающих при коммутации нагрузки. Такие конденсаторы широко распространены в фильтрах напряжения переменного и постоянного тока, в печах индукционного нагрева. В исполнении для поверхностного монтажа (SMD) они успешно эксплуатируются в различных решениях для подавления электромагнитных помех (ЭМП) и обеспечения требований по электромагнитной совместимости (ЭМС). Сегментированные пленочные конденсаторы, пропитанные не содержащим свободного масла силиконом, обычно устанавливаются в системах, занимающих промежуточную позицию на границе между низковольтными и высоковольтными приложениями, хотя с не меньшим успехом они могут быть использованы и в типичных применениях, в которых, как правило, предусмотрены сухие пленочные высоковольтные конденсаторы.

ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ ПЛЕНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Современные гибридные и высококристаллические технологии получения диэлектрической пленки позволили инженерам разработать новые неполярные полипропиленовые пленочные конденсаторы, которые обладают более широким диапазоном рабочих температур и более высокими возможностями по отдаче и приему мощности, чем все предыдущие поколения этой же и конкурирующих с ней технологий, как, например, алюминиевые электролитические конденсаторы. Достигнутые улучшения в части технологий позволяют с помощью новых конденсаторов обеспечить более высокую надежность функционирования и более эффективную защиту линий передачи мощности от скачков и провалов напряжения, а также фильтрацию собственных и кондуктивных ЭМП. Такие конденсаторы пригодны для самых различных применений на рынке силовой электроники, в том числе и в оборудовании, предназначенном для работы в системах возобновляемой энергетики и в интеллектуальных электросетях. Новые силовые пленочные конденсаторы эффективны в цепях напряжения переменного и постоянного тока, а благодаря использованию более тонких пленок обладают более высокой удельной емкостью. Однако нельзя забывать, что достижение более высокой удельной емкости, как правило, связано с ограниченными возможностями по току и, следовательно, по мощности.



Рис. 1. Шестивыводный конденсатор серии FFLC компании AVX идеально подходит для фильтрации шин напряжения постоянного тока в системах ветроэнергетики



Для того чтобы преодолеть эти ограничения, инженеры создали тонкопленочные конденсаторы с двумя параллельными пленочными элементами. Эти конденсаторы имеют четыре терминала и благодаря своей конструкции обеспечивают большую эффективность, позволяя работать на высоких токах с одновременным сохранением высокой удельной емкости устройства (рис. 1). Для обеспечения более высокого рабочего напряжения эти конденсаторы могут быть включены последовательно.

Эти и другие последние достижения в диэлектрических технологиях применительно к силовым пленочным конденсаторам позволили им не только идти в ногу с быстро развивающимся рынком силовой электроники, но и продолжать продвигать новые технологии генерации электрической энергии следующего поколения, такие как широкое использование альтернативных источников энергии и различные решения в рамках интеллектуальных электрических сетей.

Прежде и в пропитанных маслом, и в сухих силовых пленочных конденсаторах использовали специально обработанную пленку из высококристаллического полипропилена (пленка при этом из прозрачной становится матовой) с пропиткой растительным маслом. В современных силовых пленочных конденсаторах обычно предусмотрена бумага или пленка с алюминиевым покрытием, и, если конденсатор предназначен для применений, требующих большой мощности, обычно пропитывают диэлектрик минеральным маслом. Однако в отличие от минерального растительное масло (как правило, рапсовое масло) обладает лучшими тепловыми и диэлектрическими свойствами, является экологически чистым и в сочетании со специ-

ально обработанной полипропиленовой пленкой эффективно растекается между ее слоями, что способствует смягчению дуги в случае пробоя. Минеральное масло менее экологично и не так эффективно в части возможности дугогашения при использовании пленки с фольгой, но может быть полезно для бумажных диэлектриков. Некоторые новые, более совершенные силовые пленочные конденсаторы используют специальную технологию без применения масла, это делается для достижения тепловых и диэлектрических преимуществ, обеспечиваемых маслonaполненными конденсаторами. Такие конденсаторы особенно эффективны в применениях высокой мощности, в которых из-за требований по безопасности запрещено использование конденсаторов, пропитанных маслом, поскольку безмасляные конденсаторы имеют нулевой риск взрыва и, следовательно, являются безопасной альтернативой конденсаторам с масляной пропиткой (рис. 2).



Рис. 2. Безмасляные конденсаторы серии FFLI HV компании AVX — сухое решение для применений с высокими рабочими напряжениями, вплоть до 3,8 кВ

В последнее время более тонкие полипропиленовые (ПП) пленки были объединены со сложными металлизированными рисунками, что позволило создавать небольшие по габаритам конденсаторы, специально предназначенные для систем современной компактной силовой электроники преобразования мощности. В течение многих лет здесь превалирует тенденция к использованию все меньших по размерам конденсаторов, которая обретает еще большее значение из-за массового производства специально разработанных для рынка силовой электроники полупроводниковых приборов на материалах с широкой запрещенной зоной (wide bandgap, WBG). Технология WBG предоставляет возможность использовать более высокие рабочие частоты преобразования, а также более высокие рабочие напряжения и температуры, но при этом создает спрос

на еще более миниатюрные, а значит и более сложные в конструктивном исполнении компоненты.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ДЛЯ КОНДЕНСАТОРОВ

В современных силовых пленочных конденсаторах, как правило, используют более тонкие слои металлизированной пленки, чем у их предшественников, что связано с необходимостью удовлетворить требования по уменьшению их физических размеров и веса, а это, в свою очередь, затрагивает почти все стороны как их разработки, так и изготовления. Применяемые в конденсаторах пленки обычно имеют толщину 2–5 мкм, что физически ограничивает их возможности передачи тока. С одной стороны, инженеры-разработчики таких конденсаторов могут преодолеть данное ограничение — использовать более широкие, чем обычно, пленки, поскольку тогда они получают более высокую возможность передачи тока благодаря большей площади поверхности конденсатора. Как известно, емкость конденсатора может быть определена как:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d},$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды, заполняющая пространство между пластинами (в вакууме равна 1), ϵ_0 — электрическая постоянная, равная $8,854187817 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; S — площадь каждой (или наименьшей) пластины; d — расстояние между пластинами.

Использование различных процессов металлизации, включая двухслойную металлизацию, также позволяет увеличить возможности переноса тока в новых конструкциях силовых пленочных конденсаторов.

ГОРЯЧИЕ ТОЧКИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА НАДЕЖНОСТЬ СИЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Большие электрические токи, протекающие через конденсатор, играют весьма существенную роль и оказывают самое непосредственное влияние на его надежность и срок эксплуатации. Высокий среднеквадратичный ток I_{rms} может увеличить температуру в так называемых горячих точках конденсатора, что в свою очередь способно привести к локальным отказам и сократить общий срок его службы. Температу-

ру самой горячей точки θ_{HS} рассчитывают с помощью уравнения:

$$\theta_{HS} = \theta_{amb} + (P_j + P_d) \times R_{th}$$

$$\text{где } P_j = R_s \times I_{rms}^2 \text{ и } P_d = (I_{rms}^2) / (2\pi f C) \times \text{tg} \delta_0$$

где θ_{amb} — температура окружающей среды; R_{th} — тепловое сопротивление конденсатора по отношению к внешней среде; R_s — эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора; f — рабочая частота; $\text{tg} \delta_0$ — начальные потери.

В зависимости от требований конкретных применений решения, необходимые для достижения более длительного срока службы, могут включать внедрение системы принудительного охлаждения или использовать конденсатор с более высоким допустимым рабочим током.

Дополнительные элементы конструкции, способные повлиять на надежность силовых пленочных конденсаторов в высоковольтных приложениях с экстремальными условиями, включают: варианты его исполнения в части монтажа и типы терминалов, а также и то, насколько (если есть) площадь поверхности будет подвергаться воздействию принудительного воздушного охлаждения. Кроме того, необходимо учитывать уровень механических напряжений ударов и/или вибрации, которым подвергается конденсатор в условиях эксплуатации, и то, как долго он должен справляться с бросками токов или напряжений.

Функциональность силовых конденсаторов представляет собой сумму из трех первичных коррелированных параметров: температуры самой горячей точки, напряженности электрического поля между его обкладками и ожидаемого срока службы. Чтобы увеличить объемную плотность энергии, необходимо внести соответствующие коррективы в материал пленки, металлизацию и решить проблемы контролируемого самовосстановления, не забывая учитывать все перечисленные параметры. Результатом разработки будет корреляция диэлектрика конденсатора, металлизации и сегментации.

Если целью инженера является увеличение соотношения ϵE^2 (в котором ϵ — это диэлектрическая постоянная, а E — напряженность электрического поля), то объем диэлектрика конденсатора будет обратно пропорционален квадрату напряженности электрического поля. Это связано с тем, что энергия, накопленная в конденсаторе, выражена через напряжен-

ность электрического поля между его обкладками, определяется как:

$$W = \frac{(CU^2)}{2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S U^2}{2d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{2} \left(\frac{U}{d}\right)^2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon V}{2} E^2,$$

где: $V = Sd$ — объем диэлектрика между обкладками (S — площадь обкладок); $E = U/d$ — напряженность электрического поля между обкладками.

Для того чтобы улучшить функциональные показатели силового пленочного конденсатора, при выборе материала разработчики должны отдавать предпочтение пленкам из высококристаллического полипропилена, который имеет значительно меньше аморфных фаз, чем альтернативные варианты. Такие пленки обеспечивают устойчивую длительную работу конденсатора при температурах до +105 и до +115 °C в применениях, где не требуются особо длительные сроки эксплуатации. Чтобы улучшить функциональные показатели, инженеры должны стремиться избегать генерации лавинообразного пробоя и при разработке конструкции силового конденсатора тщательно выбирать металлизацию и оптимальную сегментацию его пленки. Это может быть достигнуто путем управления областью безопасности в период I^2t , когда происходит самовосстановление конденсатора.

ПРЕИМУЩЕСТВА ПЛЕНОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

На рынке коммерчески доступны силовые пленочные конденсаторы в самом широком диа-

Таблица.

Сравнение характеристик силовых пленочных и алюминиевых электролитических конденсаторов

	ПЛЕНОЧНЫЙ КОНДЕНСАТОР	ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЙ КОНДЕНСАТОР
Броски напряжения	До 2 U_{ndc}	1,2 U_{ndc} , максимум
Балансировочный резистор	Не требуется	Требуется
Устойчивость к броскам напряжения обратной полярности	Есть	Нет
Среднеквадратичный ток	До 1 А на 1 мкФ	0,025 А на 1 мкФ
Наработка на отказ, MTBF	10 млн ч	1 млн ч
Срок службы	Не менее 100 тыс. ч	40 тыс. ч
Срок хранения	Не ограничен	1 год максимум
Риск выброса вредных веществ	Нет	Есть
Последствия отказа	Не катастрофические	Катастрофические, взрыв

Примечание. U_{ndc} — номинальное рабочее напряжение по постоянному току.

пазоне конфигураций и электрических характеристик, при этом они обеспечивают более безопасные решения, чем алюминиевые электролитические конденсаторы, которые имеют ограниченный диапазон рабочих напряжений и высокий риск утечки. Кроме того, есть и конденсаторы, выполненные по другим технологиям, которые физически не могут безопасно и эффективно работать при высоких напряжениях и токах в необходимых для рассматриваемой области применения уровнях емкости.

В таблице приведено краткое сравнение силовых пленочных конденсаторов с алюминиевыми электролитическими конденсаторами.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Поскольку для большинства систем энергоснабжения, выполненных на базе альтернативных источников энергии, типичны различные флуктуации напряжения и тока, в этих электрических сетях силовые пленочные конденсаторы часто используются для фильтрации и сглаживания нежелательных пульсаций токов, а также подавления собственных помех и переходных процессов, создаваемых несбалансированными нагрузками. В системах получения энергии от альтернативных источников обычно предусмотрены AC/DC- или DC/DC-преобразователи, которые тоже не обходятся без силовых конденсаторов. В таких преобразователях силовые пленочные конденсаторы эффективно предотвращают их повреждение, гася броски напряжения, а кроме того, поскольку такие устройства способны к быстрому накоплению и отдаче сохраненной в них энергии, они способны поддерживать общую непрерывность энергоснабжения интеллектуальной сети. Кроме того, конденсаторы помогают предотвратить повреждение нагрузок сети в результате бросков тока или напряжения, принимая удары на себя.

Силовые пленочные конденсаторы чрезвычайно полезны в высоковольтных сетях переменного тока еще именно потому, что они эффективно работают в качестве компенсирующих устройств реактивной мощности. Это важно, так как многие другие компоненты, питающиеся от сети переменного тока, включая двигатели, преобразователи и сами линии электропередачи, потребляют реактивную мощность, что в целом делает систему менее эффективной. Для компенсации задержек, вызванных реактивной мощностью, силовые пленочные конденсаторы могут корректировать фазовый сдвиг тока по отношению к напряжению, что повышает эф-

фективность системы при использовании в ней двигателей, генераторов и других подключенных устройств, представляющих собой индуктивную или нелинейную нагрузку.

В высоковольтных силовых сетях постоянного тока пленочные конденсаторы могут быть сконфигурированы параллельно для достижения уровней аккумулирования энергии с высокой емкостью, которые при возникновении короткого замыкания в нагрузке могут помочь быстрым разрядом на шине напряжения постоянного тока системы стабилизировать ее выходное напряжение на заданном уровне, чтобы компенсировать его падение. Силовые пленочные конденсаторы достаточно часто используются в DC/AC- и DC/DC-преобразователях общего назначения, а также как пусковые или фазосдвигающие конденсаторы двигателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Усовершенствованные силовые пленочные конденсаторы — это критически важные элементы, активно поддерживающие непрерывную эволюцию технологий высоковольтных систем возобновляемых источников энергии и интеллектуальных электросетей. Они отличаются высокой эффективностью и длительным сроком службы, имеют высокую надежность, их параметры мало зависят от температуры, а внутренний пробой конденсатора не имеет катастрофических последствий, так как после пробоя устройство восстанавливается и способно выполнять свои функции для конкретного применения, вплоть до критической потери емкости. Кроме того, они имеют более высокую плотность мощности по сравнению с сопоставимыми технологиями. В течение всего срока эксплуатации такие устройства требуют лишь минимального обслуживания, что делает их идеальным решением в качестве компенсирующих элементов для систем энергоснабжения, выполненных на основе возобновляемых источников энергии. Это может значительно повысить общую эффективность подобных энергосистем и впоследствии способствовать их доминированию на рынке. Так что мы вполне можем увидеть полную победу таких альтернативных источников энергии, как солнечная энергия и энергия ветра, над получением электрической энергии путем сжигания ископаемого топлива.

