

Аннотация

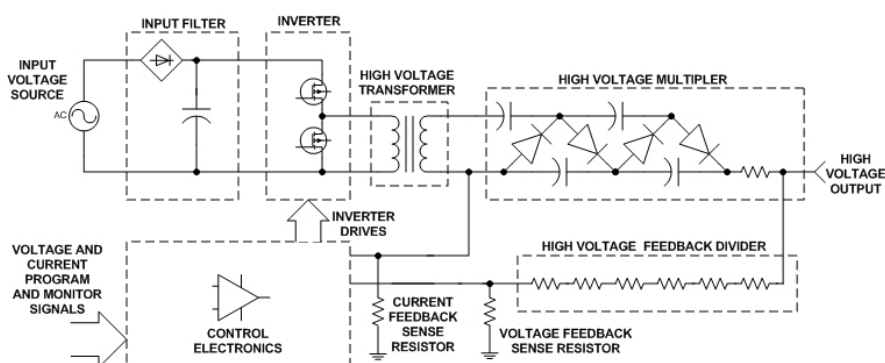
Высоковольтный источник питания – основной компонент электростатической аппаратуры. Разнообразны варианты их использования в промышленных и научных целях, представляющие интерес для инженеров, ученых и заказчиков аппаратуры. Так, в промышленных процессах требуется интенсивный контроль технологических условий в целях получения максимального выхода продукта, повышения качества и снижения себестоимости. Последние достижения в технологии высоковольтных источников позволяют обеспечить более высокие уровни контроля и управления процессами. Качество научных экспериментов также зависит от используемых в них источников питания. В настоящей статье обсуждаются такие влияющие факторы, как погрешность выхода, стабильность, пульсации и методы стабилизации источников питания.

I. Введение

Высокое напряжение повсеместно используется в научной и промышленной сферах. Например, электростатическое оборудование применяется в различных процессах. Электростатика, в широком понимании, занимается явлениями, связанными с электрическими зарядами и полями. Электростатика может использоваться для приведения материалов в движение без механического контакта, разделения материалов на составляющие вплоть до элементарного уровня, для образования однородных смесей и других практических и научных задач. Согласно определению, для того, чтобы произвести работу в электрическом поле, необходимо наличие разности потенциалов между двумя или несколькими объектами. В большинстве случаев эта энергия черпается от высоковольтного источника питания. Современный высоковольтный источник – это прибор, основанный на полупроводниковой и высокочастотной технологиях, с такими характеристиками, которые казались недостижимыми всего несколько лет назад. Существенное продвижение было достигнуто по таким показателям, как надежность, стабильность, управляемость, снижение габаритов и стоимости, повышение безопасности. Пользователь, осведомленный об этих достижениях, оказывается в выигрышном положении. К этим сведениям следует также добавить и понимание особенностей высоковольтного источника, оказывающих влияние на аппаратуру, экспериментальные исследования, технологические процессы и изделия.

II. Основы работы высоковольтного источника питания

Упрощенная принципиальная схема высоковольтного источника приведена на рис. 1.



SIMPLIFIED SCHEMATIC DIAGRAM OF
A HIGH VOLTAGE POWER SUPPLY
FIG. 1

Входное напряжение может меняться в широком диапазоне. Входной сигнал переменного тока может иметь частоту от 50 до 400 Гц напряжение от 24 до 480 В. Входное напряжение постоянного тока может меняться от 5 до 300 В. Пользователю важно уяснить, в какой степени параметры

входного напряжения будут влиять на всю работу всей системы, и, следовательно, на ее конфигурацию. Следует иметь в виду, что органы регулирования и надзора, например, Underwriters Laboratory, Canadian Standards Association, IEC и другие проводят активную работу с системами, подключенными к энергетическим сетям. Помимо функции питания главного инвертера источника питания, входное напряжение используется и для питания дополнительных управляющих цепей, и других целей.

На входе имеется фильтрующий каскад, который обеспечивает обработку входного сигнала, обычно в форме его выпрямления и фильтрации по переменному току и дополнительной фильтрации по постоянному току. Здесь же могут находиться цепи защиты от перегрузки, подавления радиопомех, электромагнитной совместимости (ЭМС) и регулирования. Выходом фильтра обычно является напряжение постоянного тока, которое подается на инвертер, преобразующий постоянный ток в высокочастотный сигнал переменного тока. Существует множество различных схем инвертеров, однако, наилучшее решение определяется всего несколькими свойствами, которыми должен обладать высоковольтный источник.

Высокочастотный сигнал с инвертера обычно подается на повышающий высоковольтный трансформатор. Применение высокочастотного сигнала позволяет добиться высоких технических характеристик при одновременном снижении размеров магнитопроводов и накопительных конденсаторов. Однако при подключении трансформатора с высоким передаточным числом к высокочастотному инвертеру возникает проблема: внесение паразитной емкости в первичную обмотку трансформатора с коэффициентом ($N_{втор}/N_{перв}$)². Это значительная емкость, и ее необходимо изолировать от ключевых устройств инвертера, в противном случае в нем появятся аномально высокие импульсные токи.

Другая особенность, характерная для высоковольтных источников – широкий диапазон нагрузок. Частыми спутниками высокого напряжения являются пробои изоляции (образование дуги). В этой связи надежность инвертера должна быть достаточно высокой с точки зрения любых возможных сочетаний открытой и короткозамкнутой цепи, а также состояний нагрузки. Все эти вопросы, включая также надежность и стоимость, должны решаться в рамках топологии инвертера высоковольтного источника питания.

Высокочастотный выходной сигнал инвертера подается в первичную обмотку высоковольтного повышающего трансформатора. Для создания качественного трансформатора требуется глубокая теоретическая и практическая проработка, понимание конструкции магнитопровода, включая анализ материалов и электромагнитных процессов. В большинстве экспертных оценок за основу принимается большое число витков и высокое напряжение вторичной обмотки. Вследствие этих факторов геометрия сердечника, технология изоляции и намотки высоковольтных трансформаторов существенно отличаются от традиционных. Могут иметь значение и другие параметры: отношение вольт/число витков вторичной обмотки, коэффициент межслойного влияния и тангенс угла потерь изоляции, геометрия намотки в контексте ее влияния на паразитную емкость и утечку, послойная пропитка намотки изоляционным лаком, уровень коронирования и другие практически важные факторы, такие как запас по перегреву или полная стоимость.

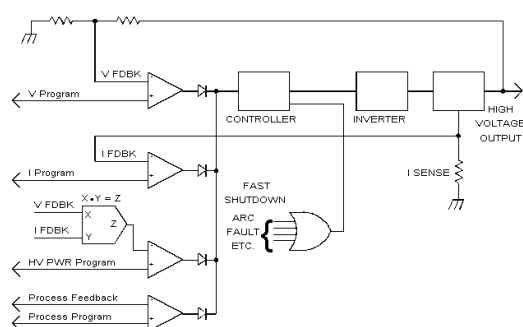
Высоковольтный умножитель выполняет функции выпрямления и умножения напряжения вторичной обмотки трансформатора. В нем применяются высоковольтные диоды и конденсаторы, собранные по схеме удвоителей напряжения. Как и высоковольтный трансформатор, умножитель требует отдельной тщательной проработки. Помимо выпрямления и умножения высоковольтная цепь выполняет также функции фильтрации на выходе, контроля (слежения) значений напряжения и тока, которые подаются в цепи ОС. Необходимо обеспечить возможность принудительного повышения выходного импеданса в целях защиты накопительных конденсаторов от разрядных токов.

Высоковольтные элементы обычно изолируют от земли в целях предотвращения дугового разряда. В качестве изоляции используют различные материалы; наиболее распространенными являются воздух, SF₆, трансформаторное масло, твердые герметики (клеи-герметики, эпоксидная смола и др.). Выбор материала изоляции и технологический контроль могут оказаться наиболее важными с точки зрения надежности высоковольтной схемы.

Цепи управления обеспечивают работу всех каскадов в едином комплексе. Степень сложности схемы управления может быть различной – от единственной аналоговой ИС до их большого числа,

и даже микропроцессора, регулирующего и контролирующего все параметры высоковольтного выхода. Однако основные требования, которым должна удовлетворять любая цепь регулирования, сводятся к точной стабилизации выходного напряжения и тока в той степени, как это необходимо по условиям нагрузки, входной мощности и заданных установок. Наиболее эффективно это достигается с помощью контура обратной связи. На рис. 2 показано, каким образом обратная связь используется в стабилизации выхода источника питания. Традиционный способ заключается в отслеживании выходных значений напряжения и тока, и сравнении измеренных значений с опорными входными сигналами. Полученная разность (сигнал ошибки) двух сигналов (обратной связи и опорного значения) подается в управляющую цепи инвертера, что в конечном итоге обеспечивает регулирование (стабилизацию) выходной мощности.

Кроме тока и напряжения можно с достаточной точностью стабилизировать и другие параметры. Управление выходной мощностью легко реализуется с помощью функции $X \cdot Y = Z$, где $V \cdot I = W$ и последующего ее сравнения с заданным опорным уровнем. Фактически любой параметр, подчиняющийся закону Ома, может быть подвергнут стабилизации – сопротивление, напряжение ток и мощность. Помимо этого, можно управлять и конечными переменными, которые зависят от параметров источника питания (интенсивность напыления, скорость потока и др.).



Power Supply Control Loops
FIG. 2

III. Стабилизация высокого напряжения

Стабилизированный источник высокого напряжения и/или тока постоянной величины играет важнейшую роль в работе электростатической аппаратуры. Изменчивость выходного напряжения или тока оказывает непосредственное влияние на конечные результаты, и по этой причине ее следует рассматривать как источник ошибок. В высоковольтных источниках ошибки опорного напряжения, которое используется для задания требуемого выходного напряжения, могут быть устранены за счет применения стабилизированного опорного источника на основе ИС. В типовых условиях стабильность должна быть не хуже $5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Соответственно, аналоговые ИС (ОУ, АЦП, ЦАП и др.) должны подвергаться тщательному отбору как <возможные> источники значительной погрешности.

В высоковольтных источниках имеется один принципиальный источник погрешности стабилизации – высоковольтный делитель напряжения в цепи обратной связи, представляющий собой резистивную цепочку (рис. 1), понижающую выходное напряжение до уровня, приемлемого для работы цепей управления (менее ≈ 10 В). Вследствие больших значений сопротивлений (обычно не менее 10 МОм, что необходимо для рассеяния мощности и снижения эффектов температурной изменчивости из-за самонагрева) и возникает проблема стабильности резисторов обратной связи. Сочетание высоковольтного напряжения и высокоомных сопротивлений потребовало специальной технологии изготовления резисторов, которые выполняются спаренными с низкоомными резисторами, чтобы позволяет поддерживать величину коэффициента деления при изменении температуры, напряжения, влажности и времени.

Высокоомные резисторы в цепи в ОС делают схему восприимчивой к малым токам наводки. Так, ток величиной 10^{-9} А может дать относительную ошибку порядка 10^{-4} . По этой причине конструкция резистора и цепи ОС должна учитывать возможность возникновения коронного разряда. Кроме того, ввиду широкого применения в технологии резисторов керамических сердечников и подложек, необходимо учитывать и пьезоэлектрические эффекты. Можно показать, что вибрация в

высоковольтном источнике питания может наводить на его выходе сигнал на частоте вибрации.

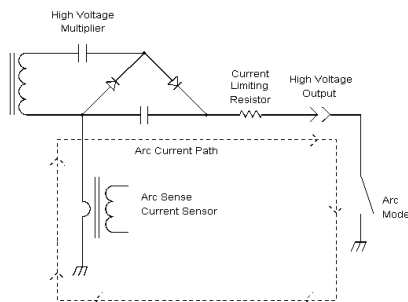
IV. Дополнительные возможности высоковольтного источника питания

Во многих высоковольтных приложениях могут потребоваться дополнительные функции по управлению обслуживаемого прибора. В этой связи разработчик должен представлять предназначение источника питания не хуже конечного пользователя; это поможет ему расширить функциональные возможности источника питания в интересах конечного результата.

Одна из типовых функций расширения – детектор дуги ("ARC Sense"). На рис. 3 приведена принципиальная схема цепи детектора. Обычно в качестве токочувствительного устройства применяется трансформатор тока или резистор, установленный на низковольтной стороне высоковольтной цепи. Типовое значение разрядного тока определяется как

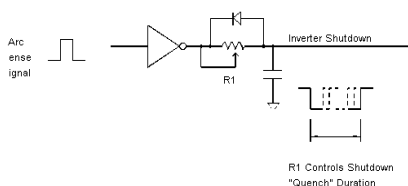
$$I = (E/R)$$

где I – ток дуги, А
E – напряжение на высоковольтном конденсаторе
R – выходное ограничивающее сопротивление, Ом



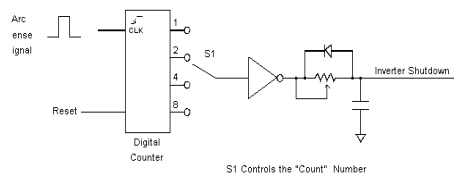
Arc Sense Circuit
FIG. 3

Ток дугового разряда, как правило, существенно превышает номинальный ток источника питания, поскольку ограничивающее сопротивление удерживается на минимальном значении, чтобы снизить потери на рассеяние мощности. Сразу после регистрации дуги могут включиться и другие функции. Так, функция гашения дуги ("Arc Quench") определяет параметр прекращения дуги при снятии приложенного напряжения. Работа функции гашения показана на рис. 4.



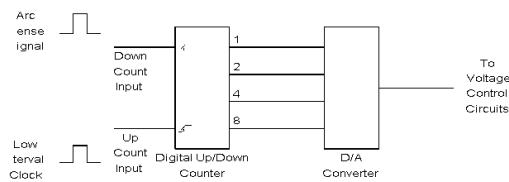
Arc Quench
FIG. 4

Если отключение источника при первом же дуговом разряде нежелательно, в цепь можно добавить цифровой счетчик разрядов (рис. 5). Отключение или гашение производится после того, как будет зарегистрировано заданное количество разрядов. Можно также ввести время обнуления счетчика, чтобы избежать его накопления за счет редких дуговых разрядов. Например, можно считать фактом регистрации дугового разряда и прибегать к отключению только в том случае, если в течение одной минуты зарегистрировано 8 разрядов.



Arc Count
FIG. 5

Одно из полезных применений схемы детектирования дуги – повышение выходного напряжения за счет установления его на уровне чуть ниже уровня разряда. Согласно этому методу, в момент детектирования дуги напряжение слегка понижается до значения, при котором дуга прекращается. Затем оно повышается автоматически в более медленном темпе (рис. 6)

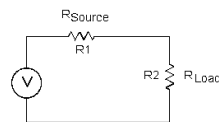


Automatic Voltage Reduction Circuit
FIG. 6

Высоковольтные источники может выполнять также функции прецизионной цепи контроля тока, В стандартной аппаратуре такой контроль может быть прецизионным только уровне не ниже единиц миллиампер или микроампер. Однако в некоторых электростатических приборах может потребоваться точность не хуже 10^{-15} А, что может быть обеспечено с помощью цепи контроля (слежения) высокого напряжения. Необходимость такой функции пользователю следует указать при оформлении заказа.

V. Generating Constant Current Sources

Во многих областях электростатики требуется поддерживать постоянным ток коронного разряда. Это можно сделать несколькими оригинальными способами. Источник постоянного тока можно представить как источник, у которого импеданс много больше импеданса питаемой нагрузки (см. схему на рис. 7).



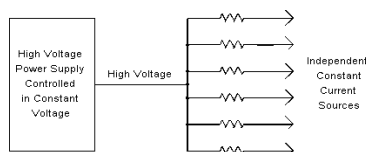
$$R_1 \gg R_2$$

$$I \approx \frac{V}{R_1} \quad (2)$$

Practical Current Source
FIG. 7

Из практических соображений ясно, что изменение сопротивления R_2 оказывает пренебрежимо малое влияние на ток сопротивления R_1 . Поэтому через оба сопротивления R_1 и R_2 – течет ток постоянной величины. В аппаратуре с единственным высоковольтным источником это можно реализовать двумя путями. Согласно первому, в схему вводится внешний резистор в качестве токостабилизирующего элемента. По второму способу вводится электронная цепь стабилизации с обратной связью (рис. 2).

В технике, где требуется много токовых выходов, применение нескольких источников питания может оказаться нерациональным. В этом случае представляется полезным применение ряда резисторов, образующих эквивалентное множество источников тока. Типовая область применения таких устройств – электростатическая обработка больших площадей (рис. 8).



Simple Multiple Current Sources
FIG. 8

VI. Заключение

В статье рассмотрены различные варианты использования высоковольтных источников питания в электростатической аппаратуре. Высоковольтные источники имеют свойства, отличающие их от обычных источников питания. Разработчики должны быть интеллектуальной опорой пользователей электростатической аппаратуры. Высоковольтный источник питания может быть наделен эффективными средствами управления.

Следует также уделить серьезное внимание вопросам безопасности. Высокое напряжение может быть смертельно опасным, и начинающий пользователь должен быть обучен правилам безопасности. Основные правила по безопасности изложены в стандарте IEEE "Руководящие указания по безопасности при испытаниях высоковольтного и силового оборудования" (Recommended Practices for Safety in High Voltage and High Power Testing, IEEE standard 510-1983) [4].

Литература:

1. C. Scapellati, "High Voltage Power Supplies for Analytical Instrumentation", Pittsburgh Conference, March 1995.
2. D. Chambers and C. Scapellati, "How to Specify Today's High Voltage Power Supplies", Electronic Products Magazine, March 1994.
3. D. Chambers and C. Scapellati, "New High Frequency, High Voltage Power Supplies for Microwave Heating Applications", Proceedings of the 29th Microwave Power Symposium, July 1994.
4. IEEE Standard 510-1983, IEEE Recommended Practices for Safety In High Voltage and High Power Testing.