

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.341.572

© Гулаков С.В.¹, Бурлака В.В.², Поднебенная С.К.³, Мостинец А.Л.⁴

ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКИ С ПОВЫШЕННОЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ

В статье рассмотрено влияние постоянной составляющей сварочного тока при TIG процессе на оборудование и технологию сварки. Рассмотрены известные способы ее компенсации. Предложен источник питания для электродуговой сварки переменным током, применение которого позволит устранить постоянную составляющую вторичного тока сварочного трансформатора, повысить коэффициент мощности сварочного трансформатора и улучшить технологию сварки за счет повышения стабильности сварочной дуги.

Ключевые слова: сварочный ток, постоянная составляющая, последовательный активный фильтр.

Гулаков С.В., Бурлака В.В., Поднебенная С.К., Мостинец О.Л. Джерело живлення для електродугового зварювання з підвищеною енергоефективністю. У статті розглянуто вплив постійної складової зварювального струму при TIG процесі на обладнання і технологію зварювання. Розглянуто відомі способи її компенсації. Запропоноване джерело живлення для електродугового зварювання змінним струмом, використання якого дозволить усунути постійну складову вторинного струму зварювального трансформатора, збільшити коефіцієнт потужності зварювального трансформатора та покращити технологію зварювання за рахунок покращення стабільності струму зварювальної дуги.

Ключові слова: зварювальний струм, постійна складова, послідовний активний фільтр.

S.V. Gulakov, V.V. Burlaka, S.K. Podnebennaya, O.L. Mostinets. TIG welding power supply with improved efficiency. In the article, the influence of the DC component of the welding current during TIG (Tungsten Inert Gas) welding is discussed. Known methods of DC current cancellation are reviewed, such as capacitor bank or diode/thyristor network insertion in the secondary circuit of the welding transformer. A new method of controlling the magnitude and shape of the TIG welding current is proposed. The idea is to insert a controlled voltage source in the secondary circuit of the welding transformer. This controlled voltage source is realized using a full-bridge voltage source inverter (VSI). VSI control system design issues are discussed. VSI is controlled by a three-level hysteretic current controller, while current reference is generated using lookup table driven by PLL (Phase Locked Loop) locked to the mains frequency. Simulation results are shown. The proposed topology of TIG power supply allows to provide magnitude and shape control of the welding current, with the limitation that its DC component must be zero. Thus, some capabilities of professional AC-TIG welders are obtained using substantially lower cost components:

¹ д-р техн. наук, професор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, gulakov_s_v@pstu.edu

² канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, vburlaka@rambler.ru

³ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, podsvet@gmail.com

⁴ аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, viper127@mail.ru

VSI built using high-current low voltage MOSFETs with control system based on 32-bit ARM microcontroller. The use of proposed TIG welding power supply will eliminate the DC component of the welding current, improve welding transformer's power factor and improve welding technology by increasing the welding arc stability.

Keywords: TIG welding, DC current, series active filter, voltage source inverter, current control.

Постановка проблеми. Для сварки алюминиевых сплавов используется процесс, при котором сварочная дуга горит между неплавящимся вольфрамовым электродом и алюминиевым изделием. При этом питание сварочной цепи осуществляется от трансформатора.

Напряжение на сварочной дуге в одном полупериоде может значительно отличаться от напряжения в другом полупериоде из-за разных эмиссионных свойств электрода и металла изделия. По этой причине в сварочной цепи возникает постоянная составляющая тока, которая может составлять до 70 – 80 % рабочего сварочного тока. Значение постоянной составляющей главным образом зависит от соотношения напряжений дуги в одном и другом полупериодах и растет с увеличением этого соотношения [1, 2]. Эта компонента сварочного тока вызывает постоянную составляющую магнитного поля в сердечнике трансформатора, что приводит к увеличению тока намагничивания, перегреву трансформатора и ухудшению условий горения дуги. Это в конечном итоге сказывается на качестве сварных соединений. По этим причинам в источниках питания переменного тока для сварки неплавящимся электродом принимаются меры по устранению или ограничению постоянной составляющей тока [2].

Анализ последних исследований и публикаций. Для устранения постоянной составляющей тока во вторичной цепи трансформатора в сварочную цепь обычно включают устройство компенсации постоянной составляющей.

Наиболее простым устройством компенсации постоянной составляющей является батарея конденсаторов, включенная последовательно в сварочную цепь (рис. 1, а).

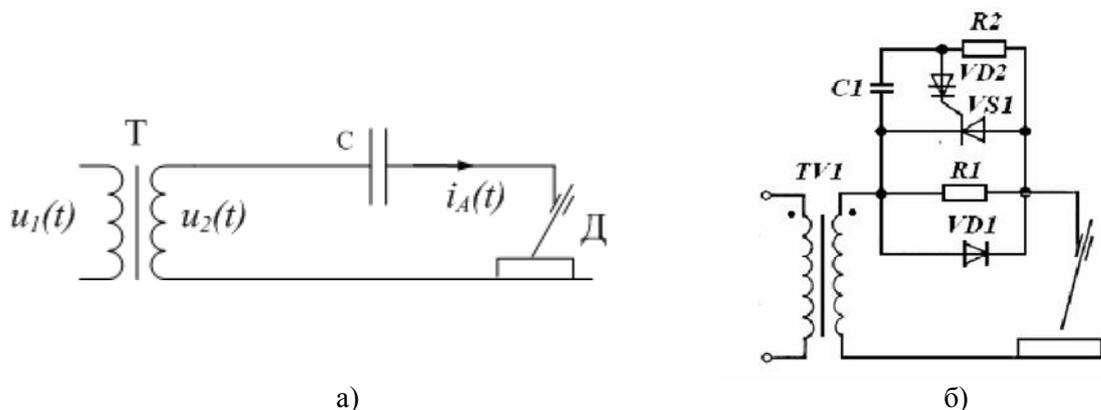


Рис. 1 – Варианты включения устройств компенсации постоянной составляющей сварочного тока: а) – батарея конденсаторов, включенная последовательно в сварочную цепь; б) – диодно-тиристорное устройство

В 50 – 60-е годы способ включения батареи конденсаторов в сварочную цепь широко использовался в источниках питания для электродуговой сварки неплавящимся электродом. Для его осуществления были разработаны специальные электролитические неполярные конденсаторы серии ЭС-1000 на 1000 мкФ, 12 В. В установках УДАР-300 и УДГ-301 на ток 315 А батарея содержит 100 таких конденсаторов, соединенных параллельно; ее масса составляет 45-50 кг. В установках УДАР-500 и УДГ-501 использовалось по 150 конденсаторов [2]. Поэтому, несмотря на простоту, этот способ обладает и недостатками: большие массогабаритные показатели, низкая надежность электролитических конденсаторов, сложность регулирования сварочного тока.

Вместо батареи конденсаторов может быть применено диодно-тиристорное устройство (рис. 1, б) [2]. Полярность диода VD1 выбирается такой, чтобы он пропускал ток в полупериоде

ды обратной полярности. В полупериоде прямой полярности диод заперт и значение тока ограничено резистором R1, включенным параллельно диоду. Для снижения рассеиваемой на этом резисторе мощности он шунтируется тиристором VS1, сигнал открытия которого формируется схемой задержки C1R2VD2. Практическая величина задержки составляет порядка 1 мс. Устройство не требует перенастройки при изменении режима сварки и обеспечивает ограничение постоянной составляющей до уровня 10 – 12 % действующего значения сварочного тока [2].

Общим недостатком вышеописанных способов является невозможность управления формой сварочного тока и относительная сложность управления его величиной (необходимо использовать трансформатор с подмагничиваемым шунтом, подвижными обмотками и т.д.).

Формулирование целей статьи. В результате анализа перечисленных способов компенсации постоянной составляющей сварочного тока установлено, что ни один из них не является эффективным, каждый из них имеет существенные недостатки. Целью исследования является разработка эффективного способа компенсации постоянной составляющей сварочного тока при сварке неплавящимся электродом, позволяющего эффективно управлять величиной и формой тока дуги, а также использовать для реализации TIG-процесса (TIG – Tungsten Inert Gas – ручная дуговая сварка неплавящимся электродом в среде инертного защитного газа) обычные сварочные трансформаторы для MMA (MMA – Manual Metal Arc – ручная дуговая сварка штучными электродами с покрытием) сварки на переменном токе.

Изложение основного материала. Постоянная составляющая сварочного тока будет отсутствовать, если среднее напряжение на вторичной обмотке сварочного трансформатора будет равняться нулю. Этого можно достичь, если во вторичную цепь включить управляемый источник ЭДС (рис. 2). При этом необходимо решить следующие задачи: 1) устранить постоянную составляющую напряжения на вторичной обмотке; 2) обеспечить регулирование активной мощности управляемого источника ЭДС – это позволит выполнить этот источник без внешнего питания; 3) обеспечить управление сварочным током и его стабилизацию.

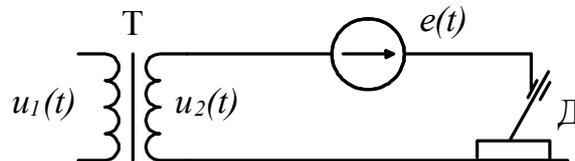


Рис. 2 – Включение управляемого источника ЭДС в сварочную цепь

В качестве управляемого источника ЭДС можно использовать последовательный активный фильтр (АФ), который включается в разрыв сварочной цепи [3].

АФ представляет собой мостовой инвертор напряжения, подключенный к накопительному конденсатору C_{DC} большой емкости (рис. 3).

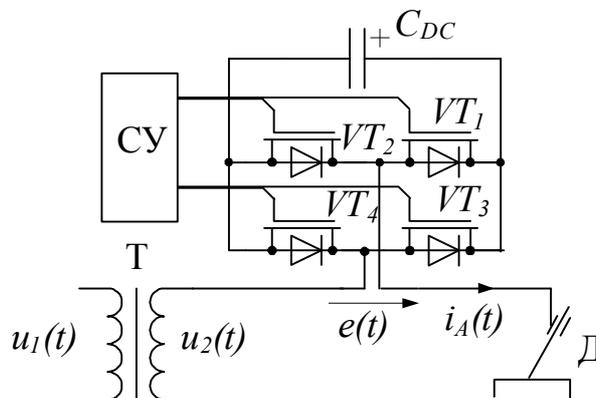


Рис. 3 – Схема включения последовательного активного фильтра в сварочную цепь

Фильтр модуляционных составляющих выходного тока инвертора в явном виде отсутствует – в его роли выступает индуктивность рассеяния сварочного трансформатора (который специально выполнен с повышенным рассеянием для обеспечения падающей вольтамперной характеристики (ВАХ), необходимой для ММА процесса).

Для решения задачи управления величиной и формой сварочного тока применено гистерезисное токовое управление инвертором АФ. При этом управляемый источник ЭДС (рис. 2) можно заменить на эквивалентный источник тока. Получающаяся схема замещения сварочной цепи будет иметь вид, представленный на рис. 4.

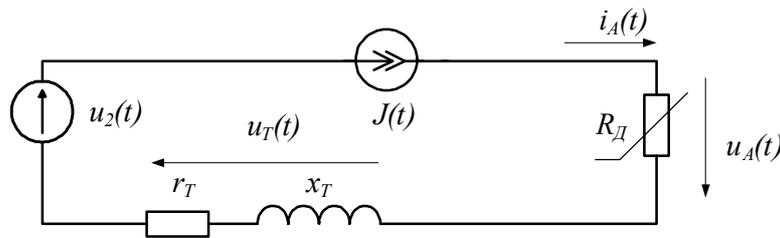


Рис. 4 – Схема замещения сварочной цепи

Источник тока обеспечивает требуемую величину и форму тока дуги с нулевой постоянной составляющей. Так как этот источник представлен инвертором АФ, возникает задача обеспечения баланса активной мощности АФ. Это необходимо для стабилизации напряжения на его накопительном конденсаторе. Указанная задача решена путем введения контура управления фазовым сдвигом кривой тока источника относительно первой гармоники напряжения сети.

Поясним это. Считая напряжение сети синусоидальным, и пренебрегая током намагничивания трансформатора, для схемы замещения сварочной цепи (рис. 4), потребляемая активная мощность P_2 может быть рассчитана как:

$$P_2 = U \cdot I_{A1} \cdot \cos \varphi, \quad (1)$$

где U – среднеквадратичное напряжение сети, приведенное ко вторичной обмотке сварочного трансформатора, В; I_{A1} – среднеквадратичное значение первой гармоники сварочного тока, А; φ – сдвиг фаз между ними.

С другой стороны, активная мощность сварочной цепи (P_2) состоит из следующих составляющих: потерь активной мощности в АФ ΔP_{AF} , потерь активной мощности во вторичной обмотке трансформатора ΔP_T и активной мощности сварочной дуги P_{ARC} :

$$P_2 = \Delta P_{AF} + \Delta P_T + P_{ARC}. \quad (2)$$

Мощности ΔP_T и P_{ARC} зависят только от установленного тока дуги. Это дает возможность управлять мощностью АФ за счет изменения угла φ согласно (1), что и нужно для стабилизации напряжения накопительного конденсатора инвертора АФ.

Структурная схема системы управления АФ приведена на рис. 5.

Регулятор тока (СС, Current Controller, рис. 5) – гистерезисный трехуровневый. Его выходной сигнал используется для сигналов управления силовыми ключами инвертора АФ (блок Deadtime, рис. 5, обеспечивающий переключение силовых ключей с бестоковой паузой).

Ток задания для СС задается в виде периодической кривой с частотой сети и с нулевым средним значением (последнее условие обуславливает отсутствие подмагничивания трансформатора). Сигнал задания тока формируется по таблице (Lookup table) и синхронизируется с напряжением сети с использованием петли фазовой автоподстройки частоты (PLL, Phase locked loop).

Фазовый сдвиг ($\Delta\varphi$) кривой тока задания относительно напряжения первичной обмотки сварочного трансформатора устанавливается с помощью ПИ-регулятора (PI-controller) напряжения на накопительном конденсаторе АФ.

Все блоки системы управления реализованы программно.

На рис. 6 приведены диаграммы напряжений и токов сварочной цепи при включении в нее управляемого источника ЭДС с токовым управлением: $u_2(t)$ – напряжение вторичной обмотки сварочного трансформатора, В; $u_A(t)$ – падение напряжения на сварочной дуге, В; $e(t)$ –

ЭДС управляемого источника ЭДС, В; $i_A(t)$ – сварочный ток, А. Следует отметить, что в ток дуги добавлена третья гармоника – это облегчает перезажигание дуги при смене полярности, а также уменьшает коэффициент амплитуды тока, что положительно сказывается на стойкости неплавящегося электрода.

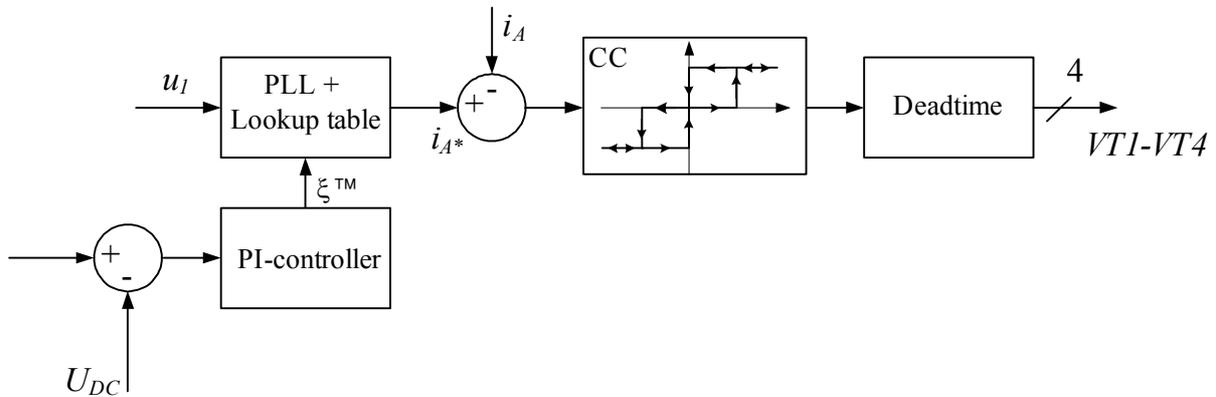


Рис. 5 – Система управления

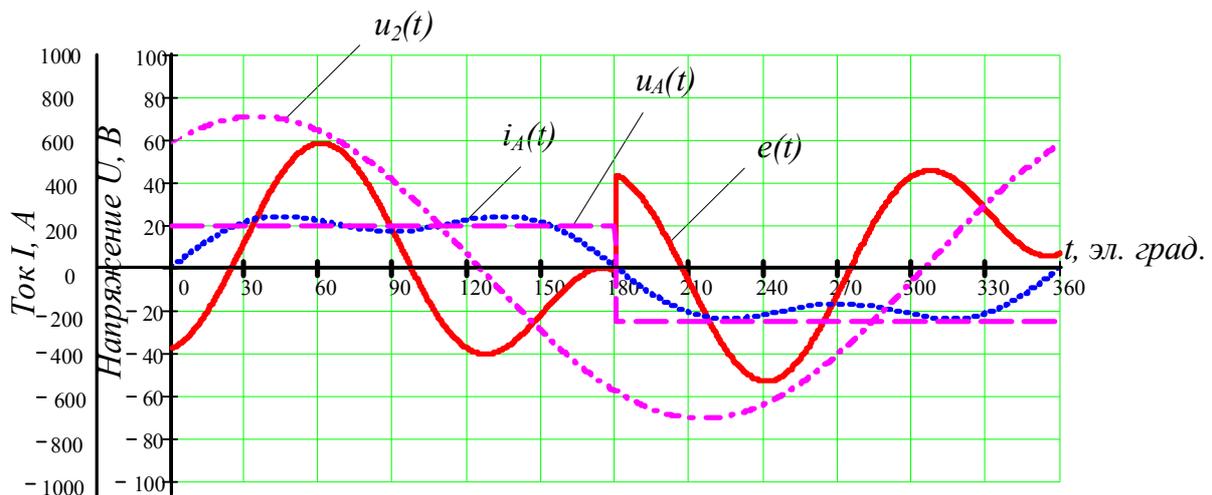


Рис. 6 – Диаграммы напряжений и токов сварочной цепи

В экспериментальном образце АФ в качестве силовых ключей использованы полевые транзисторы IRFS4010-7 (по два в параллель) для сварочного тока до 200 А. Конденсатор звена постоянного тока имеет емкость 82000 мкФ и максимальное рабочее напряжение 100 В. Схема управления инвертором выполнена с применением специализированных драйверов FOD3184 и микроконтроллера STM32F100C6T6В.

Выводы

Применение предлагаемого способа дуговой сварки переменным током позволяет устранить постоянную составляющую в сварочном токе, повысить технико-экономические показатели процесса сварки за счет улучшения стабильности тока сварочной дуги.

Список использованных источников:

1. Закс М.М. Трансформаторы для электродуговой сварки / М.М. Закс, Б.А. Каганский, А.А. Печенин. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1988. – 136 с.
2. Солодский С.А. Источники питания для дуговой сварки: учебное пособие / С.А. Солодский, О.Г. Брунов, Д.П. Ильященко // Юргинский технологический институт – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 165 с.

3. Бурлака В.В. Джерело живлення для дугового GTAW зварювання змінним струмом / В.В. Бурлака, С.В. Гулаков, С.К. Поднебenna, О.Л. Мостинець // Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, спеціалістів, аспірантів «Енергетика, енергозбереження на початку ХХІ століття», 20 березня 2014. – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2014. – С. 13.

Bibliography:

1. Zaks M.M. Transformers for arc welding / M.M. Zaks, B.A. Kaganskiy, A.A. Pechenin. – L.: Energoatomizdat. Leningrad department, 1988. – 136 pp. (Rus.)
2. Solodskiy S.A. Power sources for arc welding: a tutorial / S.A. Solodskiy, O.G. Brunov, D.P. Iljashenko // Jurginskiy technology institute – Tomsk: Publishing office of Tomsk Polytechnic University, 2012. – 165 pp. (Rus.)
3. Burlaka V.V. Power supply for GTAW arc welding / V.V. Burlaka, S.V. Gulakov, S.K. Podnebenna, O.L. Mostinets // National Scientific Conference of Young Scientists, Specialists, Graduate Students « Energy, energy saving at the beginning of the 21st century», March, 20th, 2014. – Mariupol: PSTU, 2014. – P. 13. (Ukr.)

Рецензент: В.В. Чигарев
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 10.11.2014

УДК 621.316.727

© Burlaka V.V.¹, Gulakov S.V.², Podnebennaya S.K.³, Savenko O.S.⁴

HYBRID VAR COMPENSATOR WITH IMPROVED EFFICIENCY

In modern electrical networks thyristor-switched capacitors (TSC) are most used devices for VAR compensation. These devices don't contain rotating parts and mechanical contacts, provide a stepwise control of reactive power and no generation of harmonics to the network. However, with the help of TSC it's not possible to ensure smooth control of reactive power and capacitor banks (CB) are exposed to the negative impact of higher harmonic components of the network voltage. Hybrid VAR compensator don't have such drawbacks. It consists of active filter (AF) and capacitor bank with discrete regulation. The main drawback of such systems is the necessity of accessing all six terminals of CB, while most of them are manufactured with three terminals, internally delta-connected. In the article, the topology and control system of hybrid VAR compensator free from beforementioned drawback, is proposed. The control system provides operating modes of overcompensation or undercompensation reactive power. VAR distribution regulator performs redistribution of reactive power between active filter and capacitor banks with the condition to minimize active filter's power. Scheme of the hybrid VAR compensator, which includes a three-phase three-terminal delta-connected capacitor banks, is shown. Proposed approach allows to provide smooth control of reactive power, isolate the capacitor bank from harmonic currents and use a more effective low-voltage power components.

Keywords: VAR compensator, capacitor, active filter, thyristor switching capacitors, voltage source inverter (VSI).

¹ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, vburlaka@rambler.ru

² д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, gulakov_s_v@pstu.edu

³ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, podsvet@gmail.com

⁴ специалист, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, savenko-olja@yandex.ru