

МЕТОД СИНХРОНИЗАЦИИ С ОТСЛЕЖИВАНИЕМ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ДВУНАПРАВЛЕННОЙ ИНДУКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

Соболев В.С., Силкин А.А.

Херсонский технический университет, Геническ

Ключевые слова: двунаправленная индуктивная передача мощности, синхронизация частоты, синтезатор фазовой автоподстройки частоты, беспроводная зарядка, управление активной мощностью, переключение при нулевом напряжении.

Аннотация. Двунаправленная индуктивная передача мощности является перспективной технологией, которая играет важную роль в определенных сценариях, таких как системы «беспилотник-сеть/станция/беспилотник». Однако данная система требует синхронизации частоты между первичной и вторичной сторонами. Некоторые исследователи используют выделенный беспроводной интерфейс связи для получения информации о отслеживании синхронизации. Но это решение увеличит стоимость и сложность, а также снизит надежность и универсальность системы. Поэтому в данном исследовании предлагается метод отслеживания частоты на основе синтезатора фазовой автоматической подстройки частоты для системы без принятия каких-либо коммуникаций. В частности, предлагаемый контроллер включает в себя два замкнутых контура, которые определяют и вычисляют детали активной мощности соответственно. Предлагаемый синтезатор, который включает в себя фазовый детектор, фильтр нижних частот и управляемый напряжением генератор, предназначен для генерации точного сигнала синхронизации. Кроме того, вся система работает в состоянии переключения при нулевом напряжении для достижения высокой эффективности. Наконец, экспериментальный прототип мощностью 120 Вт создается для проверки корректности и осуществимости всей системы.

FREQUENCY TRACKING SYNCHRONIZATION METHOD FOR BIDIRECTIONAL INDUCTIVE POWER TRANSFER SYSTEM

Sobolev V.S., Silkin A.A.

Kherson Technical University, Henichesk

Keywords: bidirectional inductive power transfer, frequency synchronization, phase-locked loop synthesizer, wireless charging, active power control, zero-voltage switching.

Abstract. Bidirectional inductive power transfer is a promising technology that plays an important role in specific scenarios, such as "drone-to-grid/station/drone" systems. However, this system requires frequency synchronization between the primary and secondary sides. Some researchers use a dedicated wireless communication interface to obtain synchronization tracking information. However, this solution will increase cost and complexity, as well as reduce the reliability and versatility of the system. Therefore, this study proposes a frequency tracking method based on a phase-locked loop synthesizer for the system without adopting any communications. Specifically, the proposed controller includes two closed loops, which determine and calculate the details of the active power, respectively. The proposed synthesizer, which includes a phase detector, a low-pass filter, and a voltage-controlled oscillator, is designed to generate an accurate synchronization signal. Furthermore, the entire system operates in a zero-voltage switching state to achieve high efficiency. Finally, a 120 W experimental prototype is built to verify the correctness and feasibility of the entire system.

Введение

Технология индуктивной передачи мощности играет огромную роль в таких конкретных случаях, как беспроводной нагрев, беспроводная зарядка и

беспроводные двигатели [1]. Интегрируя систему беспроводной передачи электроэнергии с системами «беспилотник-сеть» (V2G), была предложена и получила широкое внимание технология двунаправленной индуктивной передачи мощности (BD-IPT) [4]. Типичная структура системы BD-IPT изображена на рис. 1. Синхронизация векторов напряжения, производимых обеими сторонами преобразователей, может решить, можно ли напрямую управлять активной мощностью. Только когда преобразователь вторичной стороны работает синхронно с преобразователем первичной стороны, направление и количество активной и реактивной мощности можно регулировать, управляя фазовыми сдвигами и амплитудами напряжения обеих сторон.

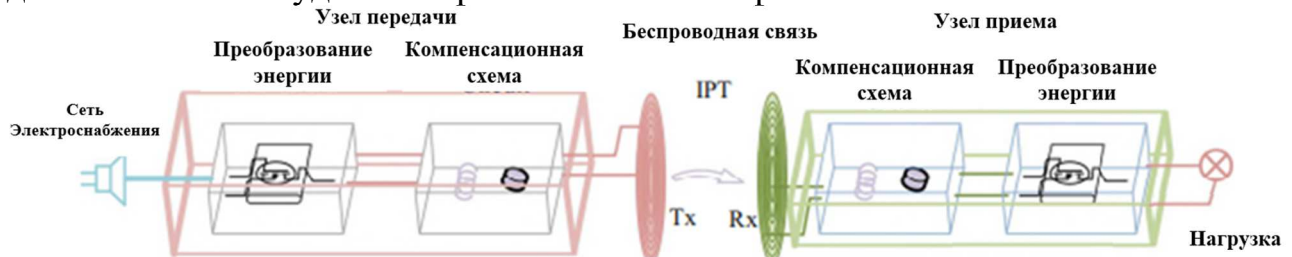


Рис. 1. Типичная система BD-IPT

Типичная система BD-IPT

Как показано на рисунке 2, преобразователь первичной стороны генерирует мощность из напряжения шины постоянного тока V_1 , в то время как вторичная сторона установлена в беспилотнике и питается от другого источника постоянного тока V_2 для работы с энергией. При резонансной топологии индуктор-конденсатор (LC) преобразователь первичной стороны выводит ток дорожки в первичной обмотке L_1 , который слабо связан со вторичной обмоткой L_2 через взаимную индуктивность. Чтобы минимизировать вольт-амперный рейтинг обоих преобразователей, первичная и вторичная LC-сети настроены на частоту дорожки f_t .

$$\omega_t^2 = (2\pi f_t)^2 = \frac{1}{L_1 C_1} = \frac{1}{L_2 C_2}. \quad (1)$$

В этом случае резонансная рабочая частота первичной стороны ω_p и резонансная рабочая частота вторичной стороны ω_s устанавливаются равными ω_t , что удовлетворяет условию:

$$\omega_t = \omega_p = \omega_s. \quad (2)$$

Однако, если два отдельных контроллера цифровых сигнальных процессоров (DSP) используются для обеих сторон без дополнительных интерфейсов, возникнет ошибка между ω_p и ω_s , устанавливающими одну и ту же частоту для контроллеров DSP [2]. На практике, поскольку кварцевые генераторы двух процессоров не могут быть абсолютно одинаковыми, и их частоты также будут изменяться из-за влияния окружающей среды. Проблемы с колебаниями мощности системы возникают со временем, даже если отклонение частоты может быть не большим. Следовательно, в этом исследовании предлагается стратегия управления на основе P и Q , которая использует обнаруженную активную мощность и реактивную мощность из коммутационного узла вторичной стороны,

что, в свою очередь, определит детали активной мощности без какой-либо беспроводной связи.

Во вторичном преобразователе есть два замкнутых контура управления, а именно замкнутый контур активной мощности и контур синхронизации частоты. Замкнутый контур активной мощности с использованием ПИ-регулятора [3] определяет сдвиг фазы ϕ_s в соответствии с опорным значением активной мощности. Что касается контура синхронизации частоты, он вычисляет угол вектора мощности для получения угла ϕ_2 и устанавливает угол потока мощности (0° - 80°) для обеспечения синхронизации между обеими сторонами с помощью источника напряжения, управляемого напряжением (ИНУН). Система также включает в себя фазовый определитель (ФО), фильтр нижних частот (ФНЧ).

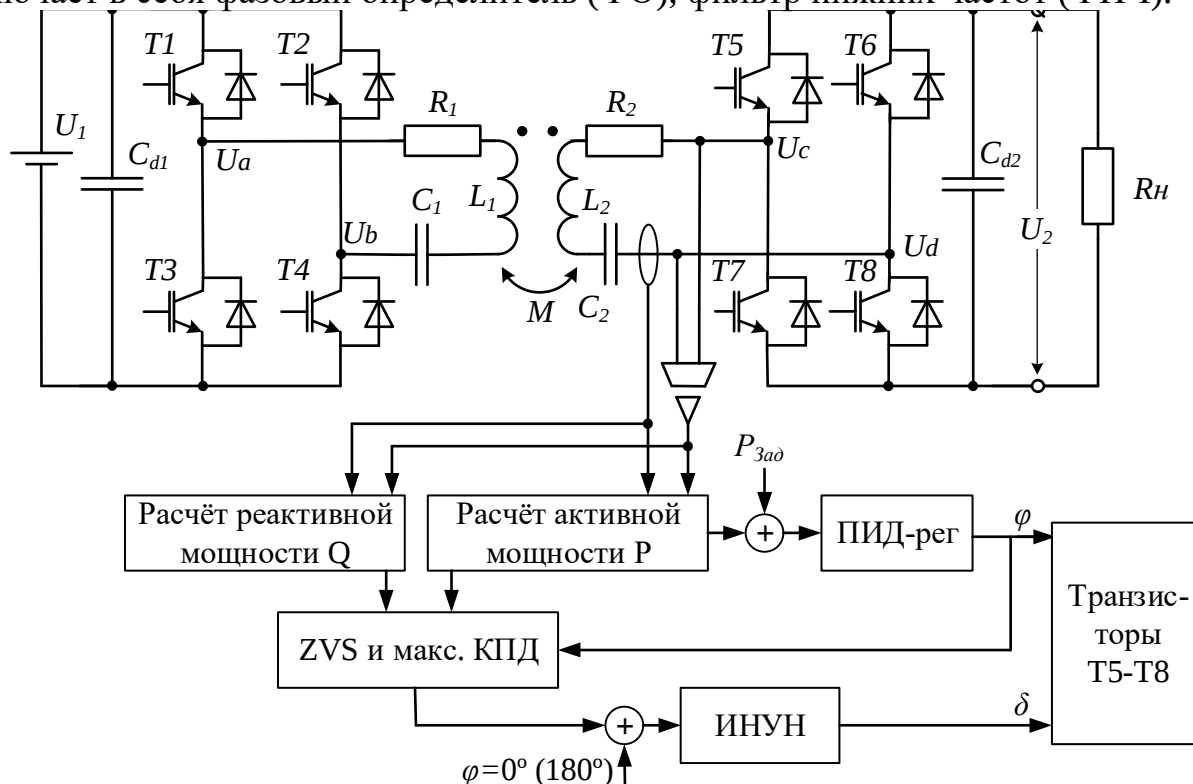


Рис. 2. Предлагаемая система BD-IPT без беспроводной связи

Что касается блока нулевого напряжения (ZVS) и Макс. КПД, его входом является угол коэффициента мощности коммутационного узла во вторичном преобразователе. Хотя наличие реактивной мощности снизит коэффициент мощности, а затем снизит эффективность системы, технология ZVS может быть достигнута для компенсации вышеупомянутых потерь мощности. Следовательно, какой процент реактивной мощности для создания максимальной эффективности должен быть определен блоком ZVS и Макс. КПД.

Предлагаемый метод синхронизации

Каркас системы на рисунке 2 можно описать с помощью источников напряжения U_{ab} и U_{cd} и рабочих цепей импеданса, как упрощенно показано на рисунке 3. Связанная беспроводная связь показана индуктивностями рассеяния L_1 и L_2 и индуктивностью намагничивания L_m .

$$L_m = \left(\frac{N_p}{N_s} \right) \cdot M. \quad (3)$$

В этой модели цепи Z_{p_in} и Z_{s_in} – это аналогичные импедансы, показанные первичной и вторичной сторонами. Все переменные импеданса, показанные с первичной стороны и вторичные преобразователи топологической модели на рисунке 3 показаны как:

$$\begin{aligned} Z_{pi} &= 1/j\omega_s C_1, & Z_{si} &= 1/j\omega_p C_2, \\ Z_{pl1} &= Z_{pi} + j\omega_s L_1, & Z_{sr1} &= Z_{si} + j\omega_p L_2, \\ Z_{pl2} &= Z_{pl1}/j\omega_s L_m, & Z_{pr1} &= (N_p/N_s)^2 Z_{sr1}, \\ Z_{sl2} &= (N_s/N_p)^2 Z_{pl2}, & Z_{pr2} &= Z_{pr1}/j\omega_p L_m, \\ Z_{sl1} &= Z_{sl2} + j\omega_s L_2, & Z_{pr3} &= Z_{pr2} + j\omega_p L_1, \\ Z_{s_in} &= Z_{sl1} + 1/j\omega_s C_2, & Z_{p_in} &= Z_{pr3} + 1/j\omega_p C_1. \end{aligned} \quad (4)$$

Как показано на рисунке 3, основная тональность и гармоники U_{ab} можно выразить как:

$$U_{ab}(t) = U_1 \frac{4}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \cos\left(n\omega_p t + \frac{n\phi_p}{2}\right) \sin\left(\frac{n\phi_s}{2}\right). \quad (5)$$

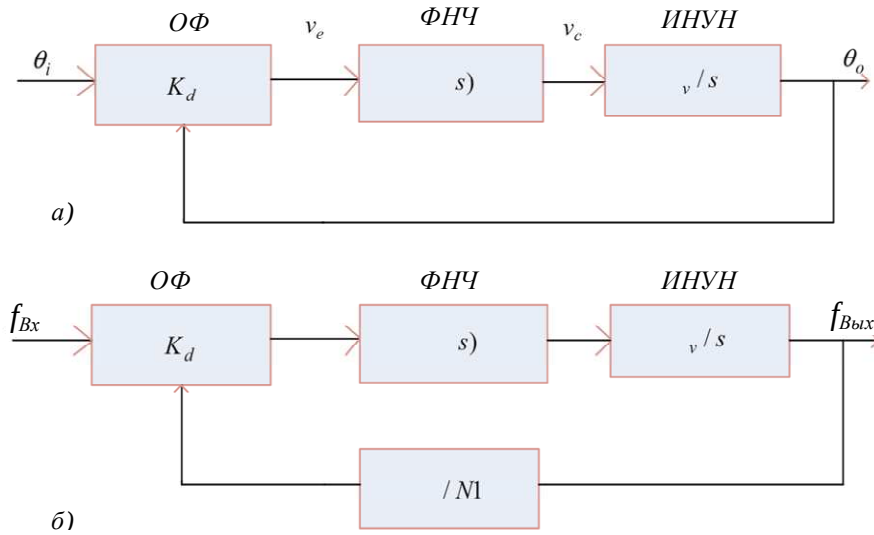


Рис. 3. а – фазовый модулятор с синтезатором фазовой автоматической подстройки частоты (ФАПЧ); б – Синтезатор с ФАПЧ

Аналогично, напряжение V_{cd} можно представить как:

$$U_{cd}(t) = U_2 \frac{4}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \cos\left(n\omega_s t + n\delta + \frac{n\phi_p}{2}\right) \sin\left(\frac{n\phi_s}{2}\right). \quad (6)$$

Согласно теореме суперпозиции, индивидуальный ток, вычисленный по U_{ab} и U_{cd} , вычисляется с замыканием, заменяющим другой источник напряжения. Таким образом, в фазовой области функция тока, полученного с обеих сторон, может быть представлена как:

$$\begin{aligned} I_1 &= \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left(\frac{U_{ab(n)}}{Z_{p_in(n)}} + \frac{U_{cd(n)}}{Z_{s(n)}} \right), \\ I_2 &= \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left(\frac{U_{cd(n)}}{Z_{s_in(n)}} + \frac{U_{ab(n)}}{Z_{p(n)}} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

где импедансы $Z_{s(n)}$ и $Z_{p(n)}$ можно получить с помощью

$$\begin{aligned} Z_{s(n)} &= N_s Z_{pi} Z_{pl1} Z_{sl1} Z_{s_{in}} / N_p Z_{sl2}, \\ Z_{p(n)} &= N_s Z_{si} Z_{pr1} Z_{pr3} Z_{p_{in}} / N_p Z_{pr2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Из (4)-(8) ток вторичного преобразователя во временной области $I_2(t)$ можно определить по формуле:

$$I_2(t) = \alpha \frac{4U_1}{\pi} \sin(\omega_p t) \sin\left(\frac{\varphi_p}{2}\right) - \beta \frac{4U_2}{\pi} \sin(\omega_s t + \delta) \sin\left(\frac{\varphi_s}{2}\right), \quad (9)$$

где параметры α и β являются постоянными и определяются всей моделью цепи:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{-jN_p Z_{pr2}}{N_s Z_{si} Z_{pr1} Z_{pr3} Z_{p_{in}}}, \\ \beta &= \frac{-j}{Z_{s_{in}}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Из уравнения (9) видно, что если рабочая частота φ_p (первичная сторона) не равна частоте MS (вторичная сторона), то активная мощность во всей системе будет равна нулю, что означает, что означает нарушение потока мощности. Поэтому сигнал I_2 преобразуется в синхронизирующий сигнал U_{sync} с помощью ФАПЧ, как показано на рисунке 3.

Когда синхронизация отслеживания частоты заканчивается, замкнутый контур активной мощности может рассчитать опорную мощность по функции (11-13) с использованием ПИ-регулятора. Что касается уравнений (11-13), величина активной мощности просто фокусируется на основном синусоидальном содержании. И с помощью уравнения (13) можно рассчитать максимальную передачу мощности.

$$P_1 = \text{Re}(\dot{U}_{ab}(\dot{I}_1)^*) = \frac{R_2 U_{ab}^2 + \omega_t M U_{ab} U_{cd} \sin \delta}{(\omega_t M)^2 + R_1 R_2}, \quad (11)$$

$$P_1 = \text{Re}(\dot{U}_{cd}(\dot{I}_2)^*) = \frac{R_1 U_{cd}^2 + \omega_t M U_{ab} U_{cd} \sin \delta}{(\omega_t M)^2 + R_1 R_2},$$

$$U_{ab} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_1 \sin \frac{\varphi_p}{2}, \quad (12)$$

$$U_{cd} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \sin \frac{\varphi_s}{2},$$

$$P_{out} = \frac{8}{\omega_t M \pi^2} U_1 U_2 \sin \frac{\varphi_p}{2} \sin \frac{\varphi_s}{2} \sin \delta. \quad (13)$$

Заключение

В этой работе был показан метод синхронизации с отслеживанием частоты для системы BD-IPT. Ключевым моментом является использование контура активной мощности для управления направлением передачи мощности и использование контура частотной синхронизации для синхронизации частот обеих сторон. Соответственно, предлагаемый метод может полностью исключить беспроводные модули связи, а также их вспомогательные цепи. Более того, вся

система может работать в состоянии ZVS для дальнейшего повышения эффективности системы. Наконец, была построена экспериментальная топология для проверки осуществимости предлагаемого подхода к управлению, который может снизить сложность системы и повысить ее стабильность.

Список литературы

1. Авдеев Б.А. Расчёт индуктивности для двунаправленного преобразователя постоянного напряжения в автономных подводных аппаратах в // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2018. – №4. – С. 107-114. – DOI: 10.24143/2073-1574-2018-4-107-114.
2. Патент № 2741064 РФ. Система беспроводной зарядки, беспроводное зарядное устройство и беспроводное устройство приема мощности / Я. Пань, Ш. Вэй, Ц. Бай. – Заявка №2019141194 от 31.07.2019; опубл. 22.01.2021.
3. Патент №2723298 РФ. Устройство беспроводного приема питания, способ и система беспроводной зарядки / Ц. Фань. – Заявка №2019141294 от 10.10.2019; опубл. 09.06.2020.
4. Liu Ye., Madawala U.K., Mai R., He Zh. Primary-Side Parameter Estimation Method for Bidirectional Inductive Power Transfer Systems // Transactions on Power Electronics. 2021, vol. 36, no. 1, pp. 68-72. DOI: 10.1109/tpel.2020.3005404.

Сведения об авторах:

Соболев Вячеслав Сергеевич – лаборант исследователь лаборатории «Изучение особенностей беспроводной зарядки беспилотных аппаратов»;

Силкин Артём Анатольевич – к.т.н., научный сотрудник лаборатории «Изучение особенностей беспроводной зарядки беспилотных аппаратов».