

Віктор Шевченко, Богдан Трейко,
Олександр Гусев, Богдан Пахалюк, Олег Хоменко

ОГЛЯД І ПОРІВНЯННЯ БАЗОВИХ ТОПОЛОГІЙ КОМПЕНСАЦІЇ ДЛЯ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ

Актуальність теми дослідження. Проведення аналізу й порівняння популярних базових класичних топологій компенсації систем з індуктивною передачею енергії (ІПЕ), дасть змогу дослідникам обрати потрібну топологію компенсації при розробці високоефективних систем індуктивної передачі енергії, зокрема для бездротових зарядних пристроїв, акумуляторних батарей електротранспорту та інших приладів.

Постановка проблеми. Зацікавленість щодо використання технологій бездротової передачі енергії (БПЕ) зростає, що зумовлено безпекою та зручністю бездротових побутових пристроїв, простотою використання електричних приладів та електротранспорту.

З огляду на те, що будь-яка топологія компенсації базується на основі базових чотирьох класичних топологій, знання їхніх фізичних особливостей і роботи допоможе зрозуміти взаємодію більш складних комбінацій топологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Були розглянуті статті на тему бездротової передачі енергії, які описують математичні моделі топологій компенсації. Більшість існуючих статей висвітлюють різні питання реалізації конкретної топології, не відображаючи проблему загалом.

Виділення не досліджених частин загальної проблеми. Узагальнено інформацію по кожній топології, виділено їхні особливості й недоліки, а також приклади їх використання в конкретних випадках.

Постановка завдання. Основними завданнями є аналіз і порівняння найбільш поширених базових класичних топологій компенсації систем з індуктивною передачею енергії та рекомендації щодо їх вибору й застосування.

Викладення основного матеріалу. Розглянуто загальні відомості про чотири базові класичні топології схеми. Так само розглянуті вимоги до схем компенсації, яких треба дотримуватися для ефективної роботи схеми ІПЕ. Проведено аналіз та порівняльна характеристика базових топологій компенсації для ІПЕ. Були наведені переваги і недоліки кожної топології і сфери їх застосування.

Висновки відповідно до статті. Результатом огляду є виділення особливостей кожної базової топології, їхні переваги й недоліки, за допомогою яких можна вибрати необхідну топологію залежно від поставленого завдання.

Ключові слова: бездротова передача енергії; індуктивна передача енергії; топології компенсації; частота резонансу; незалежність від навантаження вихідні струм та напруга.

Рис.: 4. Табл.: 1. Бібл.: 17.

Актуальність теми дослідження. Щороку у світі зростає кількість приладів, пристроїв та систем бездротової передачі енергії, особливо ємнісного та індуктивного способу передачі. Ефективність і надійність таких систем збільшується, а вартість зменшується. Аналіз топологій за певними критеріями з визначенням переваг і недоліків кожної з них та надання рекомендацій щодо вибору топології компенсації залежно від параметрів системи і сфери застосувань є важливим етапом при розробці пристроїв та систем бездротової передачі енергії.

Постановка проблеми. Поширення використання ідеології бездротової передачі енергії (БПЕ) щороку невідмінно зростає. Цьому сприяють, звісно, і популярність, зручність і безпека бездротових побутових, промислових електричних пристроїв та електротранспорту. Проводяться не тільки теоретичні дослідження та виготовляються експериментальні зразки, а й відбувається масове поширення, особливо в економічно розвинутих країнах, пристроїв БПЕ в побуті для звичайних користувачів, на виробництві. У деяких країнах (особливо скандинавських країнах Європи та Німеччині, США) відбувається стимулювання споживачів до екологічного транспорту і пристроїв і виділяються державні дотації на купівлю електромобілів.

Будь-яка топологія компенсації базується на основі чотирьох класичних топологій (по одному конденсатору на первинній і вторинній сторонах послідовно або паралельно). Знання фізичних особливостей і роботи базових топологій компенсації допоможе також зрозуміти роботу більш складних комбінацій топологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Були розглянуті статті на тему бездротової передачі енергії, які описують математичні моделі топологій компенсації. Більшість існуючих статей висвітлюють різні питання реалізації конкретної топології, не відображаючи проблему загалом.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Хоча є певна кількість статей, присвячених дослідженню та аналізу математичних моделей топологій компенсації, інформація в них зазвичай є фрагментованою. Наприклад, у [1] проведено аналіз послідовно-послідовної та паралельно-паралельної топологій компенсації, але відзначено лише, що послідовно-послідовна топологія краща для бездротових зарядних пристроїв електромобілів. В деяких інших статтях проведено порівняння окремих аспектів топологій компенсації в конкретних умовах без зазначення переваг та недоліків та застосувань у практичних розробках [2]. Тому узагальнення та виокремлення важливих аспектів дасть дослідникам ясно зрозуміти можливості основних топологій компенсації ППЕ для застосування в конкретних випадках.

Мета статті. Основною метою статті є аналіз і порівняння найбільш поширених базових класичних топологій компенсації систем з індуктивною передачею енергії та рекомендації щодо їх вибору і застосування.

Виклад основного матеріалу.

Загальні відомості та вимоги до топологій компенсації.

Для котушок системи ППЕ без фізичного контакту, які працюють на частоті значно нижче власних частот резонансу, для компенсації індуктивності витоку, реактивної потужності на первинній та вторинній сторонах та формування резонансних ємностей потрібні додаткові компенсуючі конденсатори. У цьому випадку можлива відстань між котушками збільшується, а ефективність передачі-прийому збільшується [3]. Здебільшого використовується двостороння компенсація, і така система вже буде називатися магніторезонансною, з слабким коефіцієнтом зв'язку. Одностороння компенсація використовується нечасто, вона має менш регульовані параметри резонансу, які не можуть задовольнити всі критерії для розробки системи БПЕ.

Існує 4 базові класичні компенсаційні топології (рис. 1), на основі яких створюється переважна більшість напівпровідникових рішень: послідовно-послідовні (SS), послідовно-паралельні (SP), паралельно-послідовні (PS) та паралельно-паралельні (PP). Огляд схем і використання рішень на основі цих топологій можна знайти у статті [3], так само як і про способи передачі енергії. Зокрема, за допомогою індуктивного способу передачі енергії на сьогодні розроблені майже всі комерційно успішні рішення та системи БПЕ.

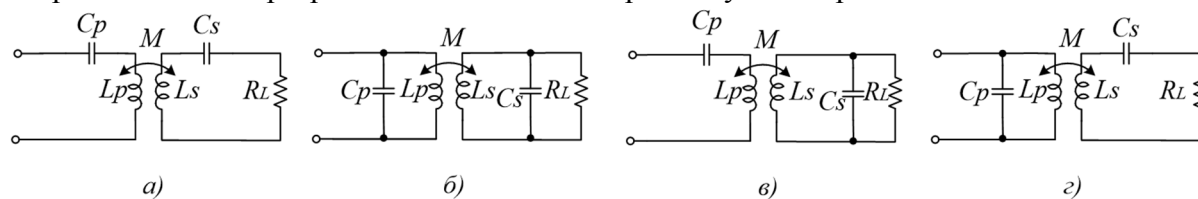


Рис. 1. Основні топології компенсації ППЕ:
 а – послідовно-послідовна (SS); б – паралельно-паралельна (PP);
 в – послідовно-паралельна (SP); г – паралельно-послідовна (PS)

Однак також використовуються та досліджуються інші компенсації, такі як LCC топологія та різноманітне поєднання компенсаційних котушок та конденсаторів [2; 4]. Одним з очевидних недоліків таких топологій є збільшення кількості пасивних елементів та проведення більш складних налаштувань і розрахунків.

Основні вимоги до схем компенсації описані в [2]. Однією з вимог є мінімізація вольт-амперних характеристик (ВАХ) та збільшення потужності передачі шляхом зменшення впливу вторинної котушки на вторинну сторону схеми. Окремим напрямком досліджень є слідування за точкою максимальної потужності та підтримка роботи системи біля цієї точки чи на певній ділянці кривої потужності.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Також бажано забезпечити постійну напругу або струм на виході (щоб не використовувати схему управління). Це, безумовно, буде як плюс для певних систем, таких як бездротові зарядки, живлення світлодіодів та ін.

Безперечно, при цьому повинна бути висока ефективність передачі енергії. Вона залежить від коефіцієнта зв'язку й добротності індуктивностей, а також від резонансної частоти вторинних та первинних сторін. При зміні позиції котушок це призводить до необхідності зміни частоти роботи. Для цього потрібен більш складний алгоритм управління. Високої ефективності можна досягти з допомогою м'якого перемикачів напівпровідників.

Серед інших вимог можна виділити біфуркаційну стійкість при нульовому куті фази (іншими словами, це – кількість робочих частот, пов'язаних із навантаженням, топологією та номінальним конденсатором). При різкому збільшенні кількості переданої енергії і може виникнути кілька режимів роботи (біфуркація) [5]. Для роботи без біфуркації контролер частоти повинен бути спроектований для роботи в межах біфуркації. Якщо системі можна працювати в біфуркаційній області, контролер повинен це передбачити та коректно відпрацювати в потрібному режимі роботи. Остання вимога про критерії біфуркації в поєднанні з контролером частоти та навантаження гарантує стабільну та високу продуктивність системи БПЕ.

Тобто чим більше вимог виконується, тим ефективніше працюватиме схема БПЕ із компенсацією.

Аналіз і порівняння базових топологій компенсації для ІПЕ.

Із чотирьох класичних топологій компенсації для індуктивної передачі енергії (ІПЕ) послідовно-послідовна та послідовно-паралельна найбільш поширені, особливо для бездротової зарядки. Це зумовлено їхніми особливостями та простотою, що аналітично буде показано далі. Ці компенсації мають найвищу ефективність серед інших класичних топологій [2; 6].

Дуже хороший аналіз топологій компенсації представлений у [7; 8]. Відзначено, що SS компенсація не залежить від коефіцієнта зв'язку (формули 1 і 2), а вихідний струм не залежить від навантаження на частоті резонансу. Послідовно-послідовна топологія, завдяки своїм особливостям, має меншу чутливість до зміни розташування котушок, при цьому частота резонансу не змінюється. Застосування SS компенсації є більш доцільним для великих потужностей, таких як заряджання акумуляторів електромобілів із навантаженням декілька одиниць і десятків кіловат [4; 9; 10].

Однак при потужності в декілька кіловат та десятків кіловат розміри котушок неодмінно слід збільшити при обох топологіях компенсації, щоб була достатня площа охолодження. Для деяких застосувань БПЕ (наприклад у біомедицині) температура пристрою не повинна перевищувати певні безпечні діапазони. Важливою перевагою SP топології є те, що вона вимагає меншої вторинної індуктивності [7], відповідно водночас потрібна більша первинна ємність [11]. Цю особливість доцільно застосовувати в біомедичних та інших компактних пристроях, наприклад бездротові зарядки для малопотужних транспортних засобів. Розміри та вага велосипеда є важливими та обмеженими, тому фізичний розмір приймального блоку повинен бути якомога меншим.

Для ілюстрації залежності компенсацій від коефіцієнта зв'язку необхідно розрахувати конденсатори для роботи на резонансній частоті. Всі подальші формули занесені до таблиці.

Параметри базових топологій компенсації для аналізу

Назва параметра	Топологія	Формула	№ формули
Первинна ємність C_p [7; 5]	SS	$C_p = \frac{1}{\omega_r^2 \cdot L_p}$	1
	PS	$C_p = \frac{L_p}{\left(\frac{\omega_r^2 \cdot M^2}{R}\right)^2 + \omega_r^2 \cdot L_p^2}$	2
	SP	$C_p = \frac{1}{\left(L_p - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot \omega_r^2}$	3
	PP	$C_p = \frac{L_p - M^2 / L_s}{\left(\frac{M^2 \cdot R}{L_s^2}\right)^2 + \omega_r^2 \cdot (L_p - M^2 / L_s)^2}$	4
Частоти для незалежних від навантаження вихідних струму та напруги [2]	ПВС для SS	$\omega = \omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_p \cdot C_p}}$	5
	ПВН для SS; ПВС для SP	$\omega_L = \sqrt{\frac{\omega_p^2 + \omega_s^2 - \Delta}{2 \cdot (1 - k^2)}}; \omega_H = \sqrt{\frac{\omega_p^2 + \omega_s^2 + \Delta}{2 \cdot (1 - k^2)}}$	6
	ПВН для SP	$\omega = \sqrt{\frac{1}{C_p \cdot \left(L_p + \frac{M \cdot L_s}{M + L_s}\right)}}$	7
Роздільне значення опору навантаження R'_L [17]	SS	$R'_L \approx Z_{C_s} = R_C + X_C = R_C + \frac{1}{2\pi F_r C_s}$	8
Еквівалентний опір $\text{Re}Z_{rr}$ та індуктивність $\text{Im}Z_{rr}$ [5]	Послідовна вторинна компенсація	$\text{Re}Z_{rr} = \frac{\omega_r^2 \cdot M^2}{R}; \text{Im}Z_{rr} = 0$	9
	Паралельна вторинна компенсація	$\text{Re}Z_{rr} = \frac{M^2 \cdot R}{L_s^2}; \text{Im}Z_{rr} = -\frac{\omega_r^2 \cdot M^2}{L_s}$	10
Критерії біфуркації [5]	SS	$Q_p > \frac{4Q_s^3}{4Q_s^2 - 1}$	11
	SP&PP	$Q_p > Q_s + \frac{1}{Q_s}$	12
	PS	$Q_p > Q_s$	13

Первинний конденсатор для SS топології розраховується за формулою (1), куди потрібно підставити лише первинну індуктивність L_p та частоту резонансу ω_r [7; 12], [5].

Для SP топології первинна ємність визначається за формулою (3), де взаємодуктивність M означає залежність розрахованого значення від коефіцієнта зв'язку. Вибір топології сильно впливає на вибір первинної ємності.

Для SS та SP топологій вторинний компенсуючий конденсатор C_s розраховується також за формулою (1) [7], потрібно тільки підставити значення вторинної індуктивності L_s .

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Важливою перевагою SS топології є те, що первинна ємність не залежить як від коефіцієнта магнітного зв'язку, так і від навантаження. Натомість SP топологія залежить від коефіцієнта зв'язку. Базові топології із послідовним конденсатором на первинній стороні застосовуються при різних частотах і при різній потужності та показують чудову ефективність.

Дві інші топології з паралельним первинним компенсуючим конденсатором PS та PP мають значно об'ємніші формули розрахунку первинної ємності (формули (2) і (4)). Крім того, вони залежать не тільки від зміни коефіцієнта зв'язку, але й від зміни опору навантаження [5], [12].

У [13] зазначено, що PS та PP компенсації для ефективної роботи потребують додаткової послідовної індуктивності для регулювання струму перетворювача через паралельний резонансний контур. Ця індуктивність збільшує розміри перетворювача та вартість системи. Іншим важливим фактором є значення вхідного опору, що особливо велике в PS і PP топологіях. Для передачі достатньої кількості енергії потрібна висока напруга [14].

Але на противагу вищезазначеному, у [15] відзначено, що PP топологія є непоганим вибором у випадку відносно далекої відстані передачі електроенергії, оскільки за таких умов вона має відносно високу потужність передачі та ефективність (рис. 2). Тобто при досить незначному значенні коефіцієнта зв'язку і відповідно взаємоіндуктивності, як визначено при моделюванні.

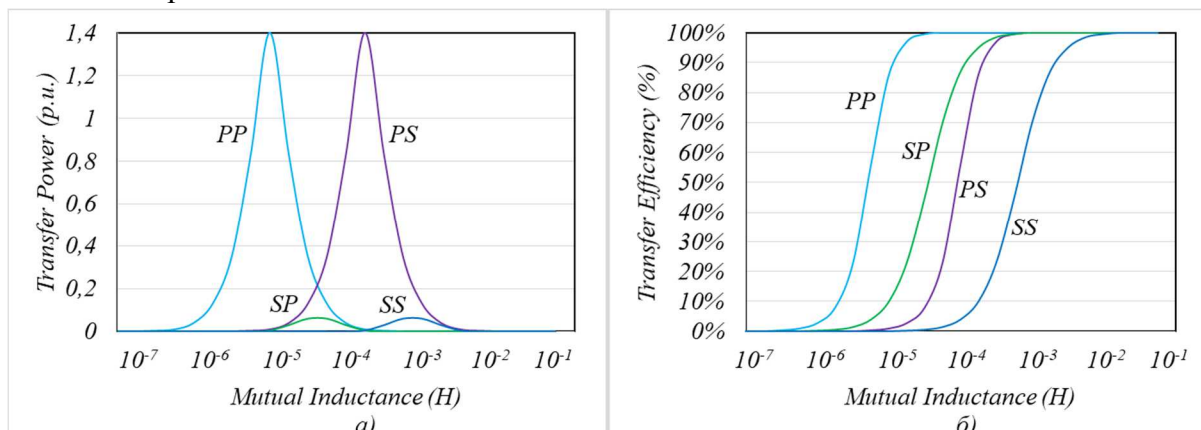


Рис. 2. Порівняння залежностей від взаємоіндуктивності для базових топологій:
а – передана потужність; б – ефективність

Джерело: [15].

Щодо вимоги про режими постійного вихідного струму чи напруги, то в найпростішому випадку їх можна досягти перемиканням топологій компенсації. Це можна зробити як на первинній, так і на вторинній стороні.

На певних частотах роботи і параметрах компенсації, можлива робота в режимі постійного вихідного струму (ПВС) чи постійної вихідної напруги (ПВН), що не залежить від зміни навантаження. У роботі дослідників [2] зазначено, що за допомогою SS та SP топологій в обох випадках компенсація може бути реалізована з вихідним постійним струмом або напругою. На двох робочих частотах у SP топології можна реалізувати режим, в якому вихідний струм не буде залежати від навантаження. Дві вищезгадані компенсаційні схеми мають найвищу ефективність серед класичних та модифікованих топологій, не в останню чергу через застосування лише двох компонентів компенсації.

Для SS компенсації визначено одну частоту, за якої відбувається робота в режимі ПВС [2]. Дуже зручно, що вона дорівнює резонансній частоті й залежить тільки від параметрів первинної компенсації (формула (5)):

Для роботи в режимі ПВН є дві частоти (нижня ω_L і верхня ω_H), які не збігаються із резонансною (формула (6)) у таблиці, де Δ – поправочний коефіцієнт; k – коефіцієнт зв'язку.

Для SP компенсації робота в режимі ПВН буде визначатись за формулою (7), а робота в режимі ПВС за формулою 6.

Єдиною різницею між двома компенсаціями є значення конденсаторів. Отже, згідно з даним аналізом, обидва типи компенсації можуть забезпечувати постійну вихідну напругу/постійний струм, але працювати на різних частотах.

Для бездротової зарядки електричних транспортних засобів для роботи в режимі постійного струму використовують SS компенсацію, а для роботи в режимі постійної напруги – SP [6; 16].

З іншої статті цих авторів [6], як продовження впливає, що в SS-топології для реалізації передачі напруги, яка не залежить від навантаження, буде дві робочі частоти (при резонансній частоті 200 кГц). Максимальна ефективність при SS компенсації може бути досягнута на більш високій частоті (але продуктивність буде трохи кращою при SP, як і більше передаточне відношення). Важливою при цьому є м'яка комутація (м'яке перемикавання транзисторів у інверторі), що зменшує втрати при перемиканні також і у випрямляючих діодах. Хоча, коли схема компенсації працює з високою ефективністю і тримає напругу, яка не залежить від зміни навантаження, м'яке перемикавання відбувається автоматично. При цьому можлива ефективна робота на високих частотах до одиниць мегагерц [8].

На рис. 3 зображені результати моделювання передачі напруги при різних умовах навантаження для SS та SP компенсацій.

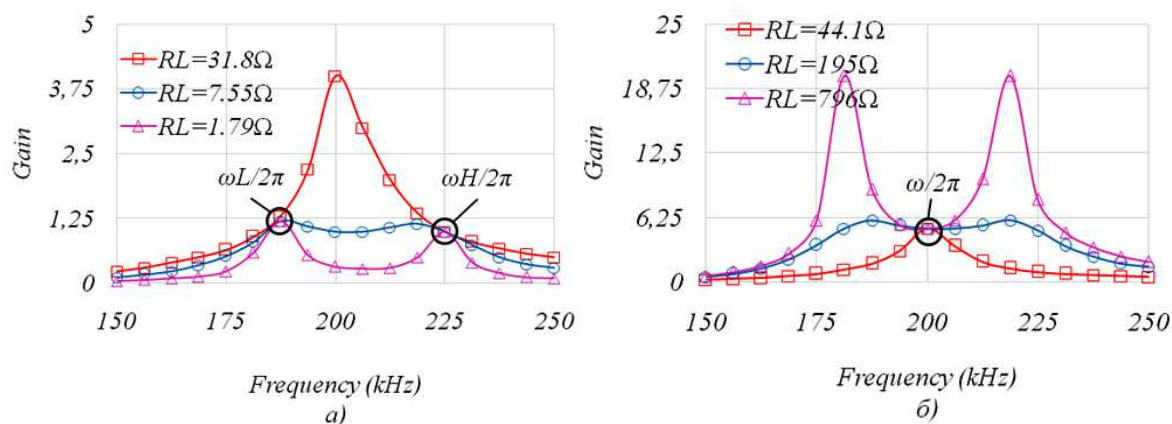


Рис. 3. Передавальна функція для:
а – SS топології; б – SP топології

Джерело: [6].

При паралельному компенсаційному конденсаторі на вторинній стороні є одна робоча частота для реалізації ПВН.

Відповідно до статті [17] продуктивність паралельної топології на вторинній стороні при значних опорах навантаження краща, ніж у послідовної. Коли роздільне значення опору навантаження R_L нижче, ніж імпеданс резонансного конденсатора на вторинній стороні Z_{Cs} , значно краща SS топологія, хоча й у досить вузькому діапазоні навантажень, характеристики на рис. 4 різко знижуються. Навпаки, при великих опорах навантаження, кращою є SP топологія через те, що паралельний імпеданс R_L та Z_{Cs} переважає імпеданс вторинного резонансного конденсатора Z_{Cs} . Імпеданс цього конденсатора приблизно рівний імпедансу опору навантаження R_L (формула (8)), де Z_{Cs} – імпеданс вторинного конденсатора, що складається з активного (R_c) та реактивного (X_c) опорів. Активним опором конденсатора можна знехтувати, оскільки його величина майже не впливає на результат.

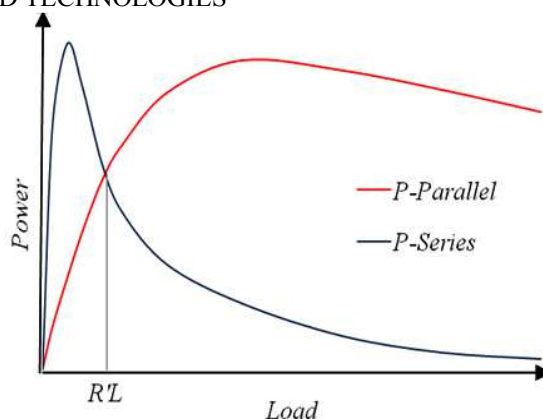


Рис. 4. Графік залежності вихідної потужності від навантаження для SS та SP топологій

Джерело: [17].

Отже, у SS топології перевагою є чудова навантажувальна характеристика, SP-топологія також має хорошу ефективність передачі при значній зміні діапазону навантаження [17].

Ще однією з переваг послідовної вторинної компенсації є те, що на резонансній частоті немає еквівалентної індуктивності $\text{Im}Z_{\text{г}}$ (формула (9)) [11]. При паралельній вторинній компенсації еквівалентна індуктивність присутня, але це можна налаштувати, оскільки це значення не залежить від навантаження (формула (10)). Зважаючи на формулу (9), для еквівалентного опору $\text{Re}Z_{\text{г}}$ струм на первинній стороні для послідовної компенсації збільшується до нескінченності, коли навантаження зводиться до нуля [5]. Аналогічний результат виникає при паралельній вторинній компенсації, оскільки навантаження збільшується до нескінченності. Це одна з основних відмінностей між вторинними послідовною та паралельною компенсаціями.

Формулами 11–13 описано критерії біфуркації для базових топологій. Зазвичай первинна (Q_p) та вторинна (Q_s) добротність більше одиниці. Найбільш проста умова в PS топології (формула (13)), тобто якщо первинна добротність більша за вторинну, то біфуркація не виникає.

Висновки і пропозиції. У цій роботі проведений аналіз основних базових топологій компенсації ППЕ. Визначено, що топології з послідовним розміщенням первинного компенсуючого конденсатора є найбільш ефективними при ППЕ для зарядних пристроїв серед чотирьох класичних схем. Встановлено, що:

1. На вибір компенсаційних конденсаторів із SS топологією не впливає коефіцієнт зв'язку та навантаження. Відповідно до цього система має нижчу чутливість до зміни позиції котушок, ніж SP компенсація.
2. Вихідний струм на резонансній частоті не залежить від зміни навантаження.
3. Рекомендоване застосування для систем із передачею більшої потужності (одиниці і десятки кіловат).
4. SP компенсація потребує вторинну індуктивність меншого розміру при тій же резонансній частоті. Це важливо для біомедичних та малопотужних транспортних засобів.
5. При SP компенсації система може ефективно працювати в більш широкому діапазоні навантажень.
6. PS та PP компенсації досить рідко використовуються через велике значення вхідного опору, складність розрахунків, залежність від коефіцієнта зв'язку й навантаження та інші недоліки; а для прийнятної ефективності вони потребують додаткову послідовну індуктивність.

Тому вибір топології для певного застосування зумовлений вихідною потужністю, частотою роботи, характером і діапазоном навантаження та сферою використання системи БПЕ. Подальші дослідження вченими топологій компенсації ППЕ можуть бути

спрямовані на поглиблення вивчення компенсацій та їх комбінацій при різних умовах роботи і параметрах, підвищення ефективності вибору пасивних компонентів компенсації для передачі оптимальної потужності.

Список використаних джерел

1. *Mohammad Hassan Ameri*. A New Maximum Inductive Power Transmission Capacity Tracking Method / Mohammad Hassan Ameri, Ali Yazdian Varjani, and Mustafa Mohamadian // *Journal of Power Electronics*. – November 2016. – Volume 16, Number 6. – Pp. 2202–2211.
2. *Wei Zhang*. Compensation Topologies of High-Power Wireless Power Transfer Systems / Wei Zhang, Chunting Chris Mi // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – June 2016. – Volume 65, Issue 6. – Pp. 4768–4778.
3. *Шевченко В.* Огляд основних технологій бездротової зарядки накопичувачів енергії для малопотужних систем / В. Шевченко, Б. Пахалюк, О. Гусев // *Технічні науки та технології*. – 2017. – № 4 (10). – С. 133–146.
4. *Chan T. Rim*. Practical Design of Wireless Electric Vehicles: Dynamic & Stationary Charging Technologies. March 2017.
5. *Chwei-Sen Wang*. Power transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled inductive power transfer systems / Chwei-Sen Wang, G. A. Covic and O. H. Stielau // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – Feb. 2004. – Vol. 51, no. 1. – Pp. 148–157.
6. *Analysis and comparison of secondary series- and parallel compensated inductive power transfer systems operating for optimal efficiency and load-independent voltage-transfer ratio* / W. Zhang, S.-C. Wong, C. K. Tse, and Q. Chen // *IEEE Trans. Power Electron.* – Jun. 2014. – Vol. 29, no. 6. – Pp. 2979–2990.
7. *Modeling and η - α -Pareto Optimization of Inductive Power Transfer Coils for Electric Vehicles* / R. Bosshard, J. W. Kolar, J. Mühlethaler, I. Stevanović, B. Wunsch and F. Canales // *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronic*. – March 2015. – Vol. 3, no. 1. – Pp. 50–64.
8. *Design and Control of a Single-Stage Large Air-gapped Transformer Isolated Battery Charger for Wide-Range Output Voltage for EV Applications* / Zaka Ullah Zahid, Cong Zheng, Rui Chen, William Eric Faraci, Jih-Sheng Jason Lai, Matthew Senesky, Dave Anderson // *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 15-19 Sept. 2013 IEEE, pp. 5481-5487.
9. *Bosshard R.* Inductive power transfer for electric vehicle charging: Technical challenges and tradeoffs / R. Bosshard, J.W. Kolar // *IEEE Power Electronics Magazine*. – Nov. 2016. – Vol. 3, no. 3. – Pp. 22-30.
10. *A New Integration Method for an Electric Vehicle Wireless Charging System Using LCC Compensation Topology: Analysis and Design* / Tianze Kan, Trong-Duy Nguyen, Jeff C. White, Rajesh K. Malhan, Chunting Chris Mi // *IEEE Transactions on power electronics*. – February 2017. – Vol. 32, no. 2. – Pp. 1638–1650.
11. *Chwei-Sen Wang*. Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger / Chwei-Sen Wang, O. H. Stielau and G. A. Covic // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – Oct. 2005. – Vol. 52, no. 5. – Pp. 1308–1314.
12. Xia, C., Zhou, Y., Zhang, J., & Li, C. (2012). Comparison of Power Transfer Characteristics between CPT and IPT System and Mutual Inductance Optimization for IPT System. *JCP*, 7, 2734-2741.
13. *Moradewicz A. J.* Contactless Energy Transfer System With FPGA-Controlled Resonant Converter / A. J. Moradewicz and M. P. Kazmierkowski // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – Sept. 2010. – Vol. 57, no. 9. – Pp. 3181–3190.
14. *Fu M.* Analysis and Optimized Design of Compensation Capacitors for A Megahertz WPT System Using Full-Bridge Rectifier / M. Fu, Z. Tang and C. Ma // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – May 2018. – PP(99):1-1. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TII.2018.2833209>.
15. *Hong H.* The Analysis for Selecting Compensating Capacitances of Two-Coil Resonant Wireless Power Transfer System / H. Hong, D. Yang and S. Won // *2017 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI)*. – Beijing, 2017. – Pp. 220–225.
16. *Huang Z.* Design of a Single-Stage Inductive-Power-Transfer Converter for Efficient EV Battery Charging / Z. Huang, S. Wong and C. K. Tse // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – July 2017. – Vol. 66, no. 7. – Pp. 5808–5821.
17. *Bailian Ni*. Design and Comparison of Parallel and Series Resonant Topology in Wireless Power Transfer / Bailian Ni, C. Y. Chung, H. L. Chan // *Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2013 8th IEEE Conference (19-21 June 2013), pp. 1832–1837.

References

1. Ameri, M. H., Varjani, A. Ya. and Mohamadian, M. (2016). A New Maximum Inductive Power Transmission Capacity Tracking Method. *Journal of Power Electronics*, 16, 6 [in English].
2. Zhang, W. & Mi, C. C. (2016). Compensation Topologies of High-Power Wireless Power Transfer Systems. Proceedings from: *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65, 6, (pp. 4768–4778) [in English].
3. Shevchenko, V., Pakhaliuk, B. & Husev, O. (2017). Ohliad osnovnykh tekhnolohii bezdrotovoi zariadky nakopychuvachiv enerhii dlia malopotuzhnykh system [Overview of the main technologies of wireless charging of energy storage devices for low-power systems]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 4 (10), 133–146 [in Ukrainian].
4. Rim, C. T. (2017). *Practical Design of Wireless Electric Vehicles: Dynamic & Stationary Charging Technologies* [in English].
5. Wang, C. S., Covic, G. A. & Stielau, O. H. (2004). Power transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled inductive power transfer systems. *Proceeding from: IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51, 1 [in English].
6. Zhang, W., Wong, S.-C., Tse, C. K. & Chen, Q. (2014). *Analysis and comparison of secondary series- and parallel compensated inductive power transfer systems operating for optimal efficiency and load-independent voltage-transfer ratio*. Proceedings from: *IEEE Trans. Power Electron.*, 29, 6, (pp. 2979–2990) [in English].
7. Bosshard, R., Kolar, J. W., Mühlethaler, J., Stevanović, I., Wunsch, B. & Canales, F. (2015). Modeling and η - α -Pareto Optimization of Inductive Power Transfer Coils for Electric Vehicles. Proceedings from: *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3, 1 [in Ukrainian].
8. Zaka, U. Z, Cong Zheng, Rui Chen, William Eric Faraci, Jih-Sheng Jason Lai, Matthew Senesky, Dave Anderson. (2013). Design and Control of a Single-Stage Large Air-gapped Transformer Isolated Battery Charger for Wide-Range Output Voltage for EV Applications. Proceedings from: *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, (pp. 5481–5487) [in English].
9. R. Bosshard, J.W. Kolar, (2016). Inductive power transfer for electric vehicle charging: Technical challenges and tradeoffs. Proceedings from: *IEEE Power Electronics Magazine*, 3, 3, (pp. 22–30), Nov. 2016 [in English].
10. Kan, T., Nguyen, T.- D., White, J. C., Malhan, R. K. & Mi, C. C. (2017). A New Integration Method for an Electric Vehicle Wireless Charging System Using LCC Compensation Topology: Analysis and Design. Proceedings from: *IEEE Transactions on power electronics*, 32, 2, (pp. 1638–1650) [in English].
11. Chwei-Sen Wang, O. H. & Covic, G. A. (2005). Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger. Proceedings from: *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52(5), (pp. 1308–1314) [in English].
12. Xia, C., Zhou, Y., Zhang, J. & Li, C. (2012). *Comparison of Power Transfer Characteristics between CPT and IPT System and Mutual Inductance Optimization for IPT System*. *JCP*, 7, 2734–2741.
13. Chan T.Rim. Practical Design of Wireless Electric Vehicles: Dynamic & Stationary Charging Technologies [in English].
13. Moradewicz, A. J. & Kazmierkowski, M. P. (2010). Contactless Energy Transfer System With FPGA-Controlled Resonant Converter. Proceedings from: *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57, 9 [in English].
14. Tang, M. Fu, Z. & Ma, C. “Analysis and Optimized Design of Compensation Capacitors for A Megahertz WPT System Using Full-Bridge Rectifier. Proceedings from: *IEEE Transactions on Industrial Informatics* [in English].
15. Hong, H., Yang, D. & Won, S. (2017). *The Analysis for Selecting Compensating Capacitances of Two-Coil Resonant Wireless Power Transfer System*. Proceedings from: *IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI)*, (pp. 220–225) [in English].
16. Huang, Z., Wong, S. & Tse, C. K. (2017). Design of a Single-Stage Inductive-Power-Transfer Converter for Efficient EV Battery Charging. Proceedings from: *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 7(66), (pp. 5808–5821) [in English].
17. Bailian, Ni, Chung, C. Y. & Chan, H. L. (2013). *Design and Comparison of Parallel and Series Resonant Topology in Wireless Power Transfer*”, *Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. Proceedings from 8th IEEE Conference (pp. 1832–1837) [in English].

UDC 621.3.08

*Viktor Shevchenko, Bohdan Treiko,
Oleksandr Husev, Bohdan Pakhaliuk, Oleg Khomenko*

OVERVIEW AND COMPARISON OF BASIC COMPENSATION TOPOLOGIES FOR WIRELESS POWER TRANSFER

Urgency of the research. Analyzing and comparing the popular basic classical topologies of compensating systems with inductive energy transfer (IPE) will allow researchers to select the required compensation topology when developing highly efficient inductive power transmission systems, in particular for wireless chargers, electric transport batteries and other devices.

Target setting. The interest in the use of wireless energy transmission (BPS) technologies is increasing, due to the safety and convenience of wireless home appliances, the ease of use of electrical appliances and electric transport.

Proceeding from the fact that any topology of compensation is based on the basis of the main four classical topologies, knowledge of their physical features and work will help to understand the interaction of more complex combinations of topology.

Actual scientific researches and issues analysis. Articles were reviewed on wireless power transmission topic, which describe the mathematical models of compensation topology. Most of the existing articles deal with various issues of implementing a particular topology, not reflecting the whole problem.

Uninvestigated parts of general matters defining. Information on each topology is generalized, highlighted their advantages and disadvantages, as well as examples of their use in specific cases.

The research objective. The main tasks are the analysis and comparison of the most common basic classical topologies of compensation systems with inductive energy transfer and recommendations for their selection and application.

The statement of basic materials. General information about four basic classical topologies of the scheme is considered. The requirements to compensation schemes that should be followed for the effective operation of the IPT scheme are also considered. The analysis and comparative characteristics of the basic compensation topologies for IPT are carried out. Advantages and disadvantages of each topology and area of their application were given.

Conclusions. The result of the research is to highlight the features of each base topology, their advantages and disadvantages. According to the research results can choose the desired topology depending on the tasks.

Keywords: wireless power transfer; inductive power transfer; compensation topology; resonance frequency; load-independent output currents and voltages.

Fig.: 4. Table: 1. References: 17.

Шевченко Віктор Олександрович – аспірант, асистент кафедри біомедичних радіоелектронних апаратів та систем, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Shevchenko Viktor – PhD student, assistant of Biomedical Radioelectronic Apparatus and Systems Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: shevaip1990@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6201-8693>

ResearcherID: R-3688-2018

Трейко Богдан Олександрович – студент, магістр кафедри біомедичних радіоелектронних апаратів та систем, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Treiko Bohdan – student, master of Biomedical Radioelectronic Apparatus and Systems Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: bohdan.treiko@gmail.com

Гусев Олександр Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біомедичних радіоелектронних апаратів та систем, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Husev Oleksandr – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Biomedical Radioelectronic Apparatus and Systems, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: oleksandr.husev@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7810-457X>

ResearcherID: F-5792-2014

Scopus Author ID: 45861130600

Пахалюк Богдан Петрович – аспірант кафедри біомедичних радіоелектронних апаратів та систем, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Pakhaliuk Bohdan – Phd student of Biomedical Radioelectronic Apparatus and Systems Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: bohdan.pakhaliuk@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2303-5084>

ResearcherID: R-4645-2018

Хоменко Олег Борисович – інженер держбюджетної теми 89/17, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Oleg Khomenko – engineer of government project 89/17, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: olbor13@gmail.com