

ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.314.58

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/48>**Арсенюк Д.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Зіньковський Ю.Ф.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЬ БЕЗМОСТОВОГО КОРЕКТОРА КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ КОНФІГУРАЦІЇ “ТОТЕМ ПОЛЕ” З ВИКОРИСТАННЯМ ШИРОКОЗОННИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ

У даній статті представлено результати дослідження та комп'ютерного моделювання безмостового коректора коефіцієнта потужності (ККП) конфігурації Totem Pole, який використовує напівпровідникові прилади з широкою забороненою зоною. Основна увага зосереджена на підвищенні енергоефективності імпульсних перетворювачів електроенергії AC-DC за допомогою активної фільтрації вхідного струму джерела живлення. Традиційні схеми ККП, що працюють на високих частотах, зазвичай зазнають значних втрат провідності через використання повномісного діодного випрямляча. Конфігурація Totem Pole вирішує цю проблему завдяки застосуванню двонаправленого перемикача, який безпосередньо випрямляє змінну напругу, знижуючи таким чином втрати провідності та кількість необхідних компонентів.

Дослідження акцентує на перевагах використання широкозонних напівпровідників, таких як транзистори на основі нітриду галію (GaN) та діоди з карбиду кремнію (SiC), які надають відмінні характеристики у порівнянні з традиційними кремнієвими компонентами. Ці матеріали характеризуються вищими значеннями електричного пробоя, підвищеною швидкістю перемикачання та кращою теплопровідністю. Інтеграція GaN і SiC у моделі ККП Totem Pole сприяє досягненню мети забезпечення вищої енергоефективності.

Стаття також розглядає останні дослідження, включаючи значні роботи щодо безмостових перетворювачів ККП на основі SiC, підкреслюючи важливість прогресивних напівпровідникових технологій у вдосконаленні конструкцій ККП. Метою дослідження є синтез теоретичних основ, презентація передових методів моделювання, аналіз даних та їх застосування у практичній сфері.

Основний матеріал статті включає моделювання за допомогою LTSpice XVII моделі безмостового ККП, яке демонструє принцип роботи, аналіз компонентів та механізм керування. Результати свідчать про високу ефективність та якість електроенергії, а розрахунок коефіцієнта потужності підтверджує його значення, що наближається до одиниці.

На завершення, стаття вносить значний вклад у сферу силової електроніки, пропонуючи модель, яка використовує новітні напівпровідникові технології для підвищення оперативної ефективності енергетичних систем, що є критично важливим для сталого розвитку силової електроніки.

Ключові слова: коректор коефіцієнта потужності, ККП, PFC, нітрид галію, карбід кремнію, GaN, SiC, широкозонні напівпровідники, SPICE, LTSpice XVII, силова електроніка.

Постановка проблеми. Коректор коефіцієнта потужності (ККП) відіграє роль активного фільтра для вхідного струму електромережі. Схеми ККП широко використовуються у перетворювачах потужності типу AC-DC, особливо в імпульсних перетворювачах.

Найбільш поширеною є схема активної корекції коефіцієнта потужності, яка використовує топологію підвищувального перетворювача для узгодження форми вхідного струму з фазою вхідної напруги, тим самим досягаючи коефіцієнта потужності, близького до одиниці. Однак, традиційний

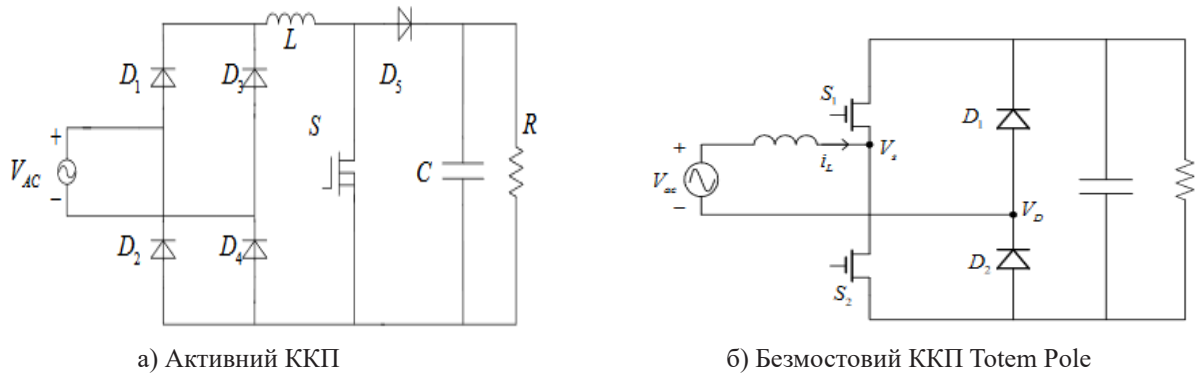


Рис. 1. Типи коректорів коефіцієнта потужності

підхід часто включає повномостовий діодний випрямляч, що призводить до значних втрат провідності через пряме падіння напруги на діодах.

Існують альтернативні топології, такі як ККП типу Totem Pole, які усувають мостовий випрямляч для зниження втрат потужності. У цій топології використовується двонаправлений перемикач на вході, який безпосередньо випрямляє вхідну змінну напругу, зменшуючи кількість компонентів, через які проходить струм. Це призводить до зниження втрат провідності та підвищення загальної ефективності, особливо на високих рівнях потужності. Така схема має ряд переваг у порівнянні з традиційними активними схемами ККП, включаючи зниження втрат потужності та підвищення енергоефективності завдяки відсутності мостового випрямляча, а також можливість зменшення форм-фактора через меншу кількість компонентів.

Однак, ця топологія має свої складності, зокрема у керуванні через двонаправлений характер перемикачів, що вимагає більш складних алгоритмів для забезпечення стабільної роботи. Високочастотне перемикання може також призвести до збільшення електромагнітних перешкод, що вимагає ретельного проектування для їх компенсації.

Важливим проривом у галузі силової електроніки стало введення широкозонних напівпровідників, таких як нітрид галію (GaN) та карбід кремнію [1]. Ці матеріали перевершують традиційні кремнієві компоненти за такими параметрами, як вищі електричні поля пробою, швидкість перемикання та теплопровідність. У контексті ККП Totem Pole, використання GaN-транзисторів та SiC-діодів є особливо вигідним. GaN-транзистори забезпечують нижчий опір у відкритому стані та менші втрати перемикання, що є критичним для високочастотних перетворювачів. SiC-діоди, у свою чергу, пропонують низьке падіння напруги

у прямому напрямку та відмінні характеристики зворотного відновлення, що підвищує ефективність схеми ККП.

Інтеграція цих широкозонних напівпровідників у ККП Totem Pole відповідає постійному прагненню галузі до підвищення енергоефективності. Завдяки зниженню втрат потужності та покращенню терморегулювання, ці напівпровідники дозволяють розробляти компактніші, надійніші та ефективніші рішення ККП, що є важливим для задоволення зростаючих вимог до енергоефективних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сфері силової електроніки, розробка ефективних технологій корекції коефіцієнта потужності (ККП) є важливим напрямком досліджень. Одним із важливих внесків у цю галузь є дослідження під назвою «Дослідження безмостового перетворювача PFC на базі SiC та стратегії управління» [2]. У цьому дослідженні аналізуються загальні проблеми, такі як високий пусковий струм, втрати в комутаційних діодах при високих частотах та втрати в режимі граничної провідності (BCM) у перетворювачах PFC з тотемним полюсом.

Дослідники представили покращену конструкцію безмостового перетворювача ККП Totem Pole, що включає SiC-діоди Шоттки та SiC IGBT. Ця конструкція ефективно компенсує вплив пускового струму та втрат провідності, що сприяє підвищенню енергоефективності схеми. Автори також розробили вдосконалену систему управління перетворювачем, засновану на принципі прямого зв'язку по напрузі. Ця система дозволяє знижувати гармонійні перешкоди, викликані стрибками струму, особливо в моменти перехрестя через нуль, що значно покращує якість електроенергії. Імітаційна модель цього покращеного перетворювача та його системи управління була реалізована за допомогою Simulink. Результати експериментів, представлені у дослідженні,

демонструють, що перетворювач досягає високого коефіцієнта корисної дії (ККД) та високої якості електроенергії при належному регулюванні системи управління.

У дослідницькій роботі під назвою «Моделювання схем корекції коефіцієнта потужності за допомогою LTspice» [3], проведено детальний аналіз методів моделювання схем електронної корекції коефіцієнта потужності (ККП) за допомогою LTspice. Дослідження включає різноманітні приклади моделювання найбільш поширених схем ККП. У моделюванні застосовується метод поциклового перемикавання та усереднена за часом модель широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Швидка внутрішня струмова петля контролює форму вхідного струму, адаптуючи її до синусоїдальної форми вхідної змінної напруги. Модель ШІМ із усередненням за часом є ключовою для ефективного моделювання численних циклів, сприяючи розробці та аналізу систем управління з вторинним зворотним зв'язком, які регулюють вихідну напругу у розглянутих моделях пристроїв.

Це дослідження становить значний прогрес у моделюванні схем корекції коефіцієнта потужності за допомогою LTspice XVII, відкриваючи шлях для подальших досліджень, особливо у сфері інтеграції передових напівпровідникових технологій та їхнього впливу на продуктивність схем ККП. Майбутні дослідження можуть базуватися на цій роботі, адаптуючи методики до конкретних конфігурацій ККП.

Ці дослідження підкреслює значення інтеграції компонентів на основі SiC у ККП типу Totem Pole, що відповідає загальній тенденції в галузі використання напівпровідникових матеріалів з широкою забороненою зоною, таких як нітрид галію (GaN) та карбід кремнію (SiC), для досягнення високих характеристик.

Постановка завдання. Підвищення енергоефективності систем перетворення енергії є ключовим завданням у сфері силової електроніки. У цьому контексті, основною метою дослідження є розробка рішень для корекції коефіцієнта потужності з використанням інноваційних напівпровідникових технологій. Дослідження базується на всебічному аналізі сучасної літератури, що охоплює еволюцію та актуальний стан методологій ККП. Ця робота закладає фундамент для головної мети: створення та апробації новітньої моделі моделювання безмостових ККП Totem Pole.

Мотивацією дослідження є необхідність оптимізації експлуатаційної ефективності енергетич-

них систем, що набуває особливої актуальності в умовах глобального прагнення до енергозбереження та сталого розвитку. Використання напівпровідників із широкою забороненою зоною, таких як польові транзистори (FET) на основі нітриду галію (GaN) та діоди Шоттки з карбіду кремнію (SiC), відкриває перспективи для подолання обмежень традиційних кремнієвих рішень. Очікується, що застосування цих матеріалів сприятиме підвищенню швидкості перемикавання, теплових характеристик та загальної ефективності системи.

Конкретні цілі статті включають:

- Теоретична основа: розробка надійної теоретичної бази шляхом аналізу сучасних досліджень у галузі технології ККП, що дозволить виявити потенціал для прогресу в цій сфері.

- Методологія моделювання: представлення інноваційної методології моделювання для ККП Totem Pole, яка включає використання GaN-транзисторів з високою рухливістю електронів (HEMT) та SiC-діодів Шоттки. Методологія реалізована у середовищі симулятора LTSpice XVII, що підкреслює практичність та доступність запропонованого підходу.

- Аналіз та візуалізація даних: проведення ефективного моделювання для створення комплексного набору даних, який подається у вигляді графіків струму та напруги. Це дозволяє виявити первинні втрати потужності в компонентах ККП та визначити потенційні напрямки підвищення енергоефективності.

- Інтеграція теорії та практики: злагодження теоретичних досліджень та практичного застосування, надаючи модель, яка може слугувати основою для майбутнього проектування та оптимізації схем ККП.

Стаття має на меті зробити внесок у розвиток силової електроніки, зокрема в області технології ККП. Актуальність дослідження підкреслюється необхідністю розробки енергоефективних рішень, які відповідають вимогам сучасних електричних систем, враховуючи їх продуктивність та вплив на навколишнє середовище.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 представлена модель конфігурації безмостового коректора коефіцієнта потужності, розроблена у LTSpice XVII. Джерело синусоїдального вхідного змінного струму позначено як V1.

Принцип роботи базується на чергуванні переключень транзисторів залежно від полярності змінного струму [4]. Високочастотні транзистори разом з індуктором формують синхронний режим під-

Порівняння електричних характеристик польових транзисторів

Польовий транзистор	Електричні характеристики					
	V_{DS}, V	i_d, A	$Q_G, нКл$	$Q_{GS}, нКл$	$Q_{GD}, нКл$	$R_{DS(ON)}, мОм$
GS-065-060-3-B	650	60	14	3.8	4.3	25
IPW60R045CP	650	60	150	34	51	45

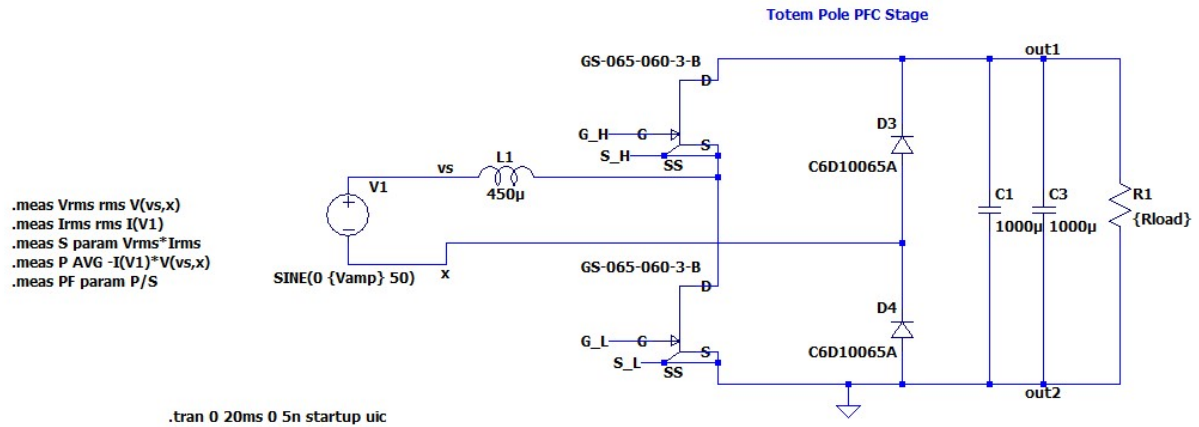


Рис. 1. Модель безмостового коректора коефіцієнта потужності у LTSpice XVII

вищуючого перетворювача. У позитивному циклі роботи один транзистор виступає перемикачем підсилення, активованим робочим циклом, тоді як протилежний ключ керується широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Протягом цього циклу діод, протилежний до робочого ключа, постійно проводить струм. У негативному циклі роботи пристрою ролі високочастотних перемикачів на верхньому та нижньому плечах міняються місцями.

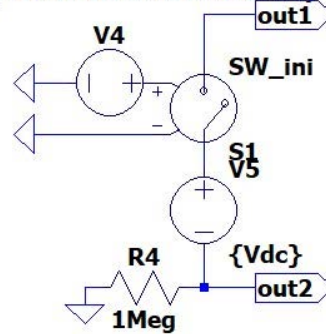
Порівнюючи транзистори на основі нітриду галію та транзистори на основі кремнію з аналогічними електричними характеристиками (див. табл. 1), пристрої на основі нітриду галію, завдяки відсутності режиму зворотного відновлення (через відсутність вбудованого діоду) у посилених структурах GaN-транзисторів, мають менші втрати провідності та нижчі втрати при перемиканні, що забезпечує більшу енергоефективність приладу. У представленій моделі використано GaN HEMT типу GS-065-060-3-B та SiC діоди типу C6D10065A із зворотною напругою 650 В та прямим струмом 10 А.

Коректний старт моделі забезпечується механізмом попередньої зарядки вихідних конденсаторів (C1, C3) до 400 В, який після цього відключається від схеми коректора коефіцієнта потужності шляхом розмикання ключа. Наступна підсхема зображена на рис. 2. Для забезпечення стабіль-

ності від’ємна шина на виході заземлюється опором у 1 МОм.

Precharge circuit

PULSE(10 0.0 1.8ms 1us 1us 10s)



.model SW_ini SW(Ron=0.2 Roff= 1000k Vt=1)

Рис. 2. Схема попередньої зарядки вихідного конденсатор

GaN транзистори керуються ШІМ-модулятором, підсхема якого представлена на рис. 3. Конструкція схеми є ключовою для правильної роботи перетворювача. Вихідна напруга ШІМ на затворі транзистора відноситься до витоку. При позитивній напрузі транзистор включається, а негативна напруга використовується для утримання його у вимкненому стані. Джерела напруги

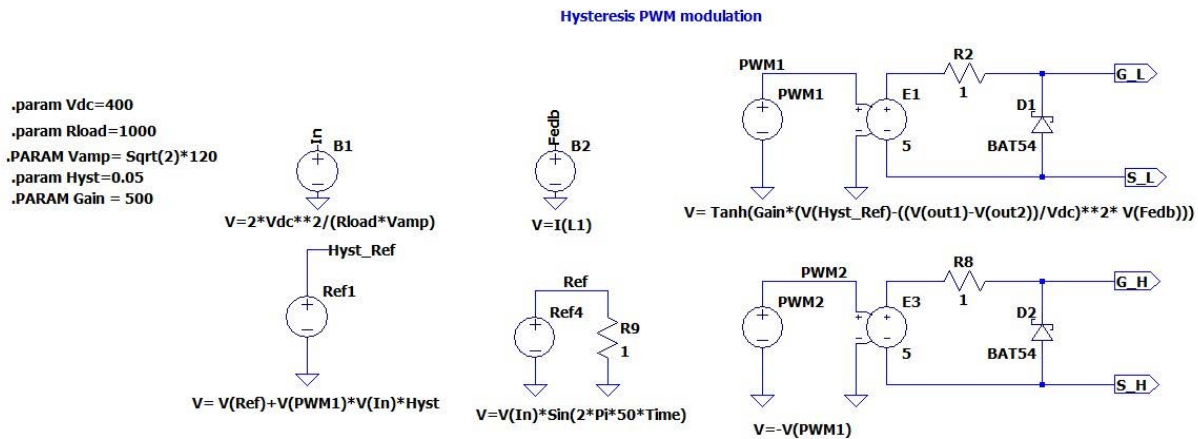


Рис. 3. Схема гістерезисного ШІМ модулятора

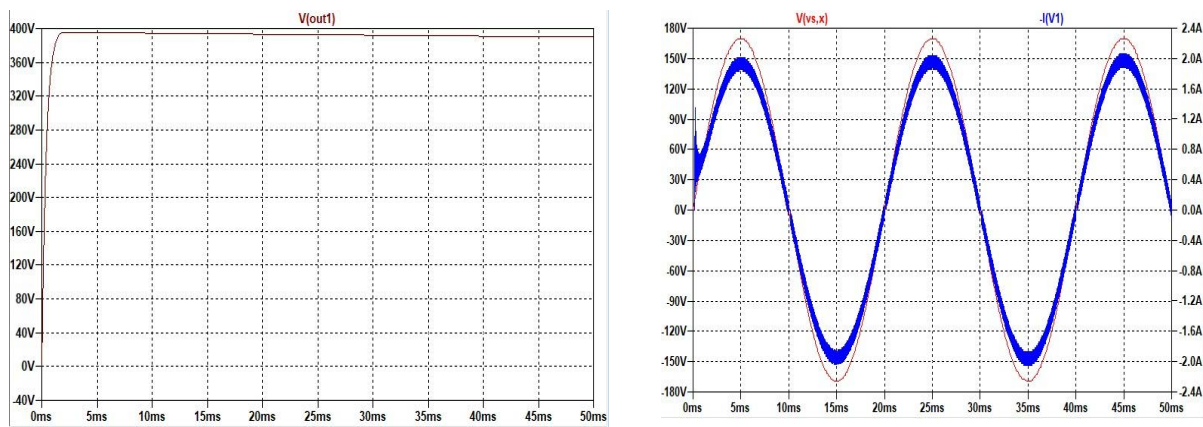


Рис. 4. Характеристики ККД: а) напруга на виході; б) напруга і струм на вході

E1 та E3 підвищують вихідну напругу джерела ШІМ з 1 до 5 В. Опорна напруга у вигляді синусоїди забезпечується джерелом Ref4. Джерело PWM1 порівнює опорну напругу з актуальним рівнем струму в індукторі L1 та виводить ШІМ-сигнал, використовуючи метод м'якого компаратора. Цей метод застосовує функцію гіперболічного тангенса для створення ШІМ-сигналу з плавними переходами, сприяючи конвергенції [5, с. 1404]. Параметр підсилення (Gain) використовується для посилення кривої, імітуючи реалістичні переходи ШІМ-сигналу. Джерело PWM2 генерує протилежне значення сигналу PWM1 для коректного перемикавання фаз роботи перетворювача. Джерело напруги Ref1 додає або віднімає компонент гістерезису на 5%, додаючи частину напруги ШІМ від PWM1 до Ref4, отримуючи значення Hyst_Ref. Значення навантаження становить 1 кОм. Вихідна потужність пристрою 400 Вт.

На рис. 4а зображена напруга на виході коректора коефіцієнта потужності, яка становить 400 В

з пульсацією напруги 3 В. На рис. 4б представлено напругу та струм на вході перетворювача. Вони мають синусоїдну форму без фазового зсуву.

Розрахунок коефіцієнта потужності полягає у визначенні відношення робочої потужності до повної потужності. Значення повної потужності – це добуток середньоквадратичного вхідного напруги та струму, яке, за результатами аналізу, складає 166.27 ВА. Робоча потужність становить 166 Вт. Отже, коефіцієнт потужності складає $PF = P/S \approx 0,998644$.

Висновки. У рамках цього дослідження було розроблено новітній метод моделювання коректора коефіцієнта потужності типу Totem Pole, який базується на використанні напівпровідників з широкою забороненою зоною у програмному середовищі LTSpice XVII. Данаробота включає глибокий аналіз сучасних досліджень у сфері мережевих коректорів коефіцієнта потужності. В результаті були отримані графіки струму та напруги для моделі коректора коефіцієнта потужності

з номінальною потужністю 400 Вт. Результати моделювання демонструють коефіцієнт потужності на рівні 0,99, що підтверджує високу ефективність запропонованої моделі.

Це дослідження вносить значний вклад у розвиток силової електроніки, представляючи модель, що інтегрує передові напівпровідникові технології.

Таке досягнення є критично важливим для підвищення експлуатаційної ефективності енергетичних систем, що є ключовим аспектом для сталого розвитку у сфері силової електроніки. Інтеграція цих технологій не тільки сприяє оптимізації продуктивності, але й відкриває нові перспективи для інновацій у проектуванні енергетичних систем.

Список літератури:

1. Comparison of 600V Si, SiC and GaN Power Devices / S. Chowdhury та ін. Materials Science Forum. 2014. Т. 778-780. С. 971–974. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.778-780.971> (дата звернення: 11.11.2023).
2. Fan C., Liu F., Zhao S. Research on SiC-based Totem-pole Bridgeless PFC Converter and Control Strategy. 2023 6th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE), Guangzhou, China, 12–14 трав. 2023 р. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/ceepe58418.2023.10165796> (дата звернення: 11.11.2023).
3. Giesselmann M., Roy V. Modeling Power Factor Correction Circuits with LTspice. 2018 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), Jackson, WY, USA, 3–7 черв. 2018 р. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/ipmhvc.2018.8936816> (дата звернення: 11.11.2023).
4. Su B., Zhang J., Lu Z. Totem-Pole Boost Bridgeless PFC Rectifier With Simple Zero-Current Detection and Full-Range ZVS Operating at the Boundary of DCM/CCM. IEEE Transactions on Power Electronics. 2011. Т. 26, № 2. С. 427–435. URL: <https://doi.org/10.1109/tpel.2010.2059046> (дата звернення: 11.11.2023).
5. Rashid M. H. Power Electronics Handbook. 4-те вид. Saint Louis, USA : Elsevier Science, 2017. 1522 с.

Arseniuk D.O., Zinkovsky Yu.F. MODEL OF BRIDGELESS TOTEM POLE POWER FACTOR CORRECTOR USING WIDEBAND SEMICONDUCTOR DEVICES

This article presents a comprehensive study and computer modeling of a bridgeless power factor correction (PFC) Totem Pole configuration, leveraging the capabilities of wide-bandgap semiconductor devices. The primary objective is to augment the energy efficiency of AC-DC power converters through active input current filtering in power supplies. The research highlights the limitations of traditional PFC topologies, particularly the significant conduction losses incurred from the use of a full-bridge diode rectifier. To address this, the Totem Pole configuration is introduced, utilizing a bidirectional switch for direct rectification of alternating voltage, which results in reduced conduction losses and fewer components.

The study underscores the benefits of employing wide-bandgap semiconductors, specifically gallium nitride (GaN) based transistors and silicon carbide (SiC) diodes. These materials outperform traditional silicon components due to their higher breakdown voltages, faster switching speeds, and superior thermal conductivity. The integration of GaN and SiC into the Totem Pole PFC models is pivotal in achieving enhanced energy efficiency.

Additionally, the article delves into recent research developments, including significant advancements in bridgeless SiC-based PFC converters. This underscores the critical role of advanced semiconductor technologies in refining PFC designs. The research aims to amalgamate theoretical foundations with advanced modeling methods, data analysis, and practical applications.

The core of the article involves modeling using the bridgeless PFC model in LTSpice XVII, elucidating the operating principles, component analysis, and control mechanisms. The findings reveal high efficiency and power quality, with power factor calculations nearing unity.

In summary, this article contributes significantly to the field of power electronics by proposing a model that harnesses state-of-the-art semiconductor technologies. This model enhances the operational efficiency of energy systems, which is vital for the sustainable development of power electronics.

Key words: Power Factor Correction, PFC, Gallium Nitride, Silicon Carbide, GaN, SiC, Wide-Bandgap Semiconductors, SPICE, LTSpice XVII, Power Electronics.