

ОБЗОР НА ДВУПОСОЧНИТЕ GAN КЛЮЧОВЕ ЗА ПРИЛОЖЕНИЯ В ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНИЯ

Красимир Гичев*, Доброслав Данков

Технически университет – Габрово, България

*кореспондиращ автор: krasimirr@gmail.com

OVERVIEW OF BIDIRECTIONAL GAN SWITCHES FOR NEXT- GENERATION MOTOR DRIVE APPLICATIONS

Krasimir Gichev*, Dobroslav Dankov

Technical University of Gabrovo, Bulgaria

*Corresponding author: krasimirr@gmail.com

Abstract

Recent developments in Gallium Nitride (GaN) power devices have enabled the realization of bidirectional switches that can conduct current and block voltage in both directions. These devices offer new opportunities for compact and efficient power conversion in motor drive systems, where traditional silicon or SiC solutions face trade-offs between efficiency, switching speed, and complexity[1,2]. This paper presents an overview of bidirectional GaN switch topologies, their operating principles, and practical design considerations relevant to PMSM and BLDC motor controllers. Emphasis is placed on how these switches can simplify converter architectures, improve regenerative operation, and reduce switching losses in AC-DC, DC-DC, and inverter stages. The work is review-based, summarizing results from scientific literature, conference papers, and manufacturers' application notes to provide a clear picture of current capabilities, limitations, and potential future directions for GaN-based motor control solutions.

Keywords: GaN, bidirectional switch, BDS, matrix converter, motor drive, power electronics, efficiency

ВЪВЕДЕНИЕ

През последните години индустриалните електрозадвижвания се развиват в посока на по-висока енергийна ефективност, по-компактна конструкция и по-гъвкави режими на работа. Оптимизацията на енергопотреблението е от решаващо значение за постигане на устойчиво производство и намаляване на експлоатационните разходи [3]. Това развитие е тясно свързано с нарастващите изисквания към динамичните характеристики на електрозадвижванията, като повишена точност на управлението, по-бърз отклик и способност за работа в различни режими, включително регенеративно спиране

и връщане на енергия в електрическата мрежа [4].

Подобни функционалности са характерни за съвременните серво-задвижвания, системите за рекуперация на енергия, както и за vehicle-to-grid (V2G) приложенията при електрическите превозни средства [5].

Класическите полупроводникови елементи на силициева основа – MOSFET и IGBT – дълги години са основен избор в честотните инвертори и преобразуватели на електрозадвижвания. Въпреки тяхната надеждност и утвърдена технология, те демонстрират редица ограничения, свързани с високите загуби при

превключване, ниските работни честоти, големите габарити и необходимостта от обемни охлаждателни системи [6], [7]. Тези ограничения водят до по-ниска ефективност и ограничават възможностите за реализация на компактни и високопроизводителни устройства, особено в приложения с двупосочен поток на енергия [7].

Развитието на нови широкозонови полупроводникови материали, като силициев карбид (SiC) и галиев нитрид (GaN), открива нови хоризонти за подобряване на ефективността и компактността на силовите електронни системи [1][2]. Широката забранена зона на тези материали позволява работа при повишени напрежения, температури и честоти, което води до съществено намаляване на загубите и до повишаване на мощностната плътност [8]. Сред тях, GaN се откроява със своите изключителни физични свойства – висока електронна подвижност, критично електрическо поле на пробив над 3 MV/cm и нисък паразитен капацитет на гейта [9]. Тези параметри правят възможна реализацията на комутационни честоти в диапазона на MHz, което драстично намалява размерите на пасивните елементи и подобрява динамиката на системата. Въпреки тези предимства, повечето комерсиални GaN решения към момента са предназначени за еднопосочна работа, като позволяват протичане на ток само в една посока. Това ограничава използването им в двупосочни топологии, характерни за рекуперативни системи, матрични инвертори и активни двупосочни преобразуватели (Active Front End, AFE) [10]. За реализацията на такива схеми са необходими допълнителни елементи или сложни конфигурации от два еднопосочни транзистора, което увеличава броя на компонентите и влошава ефективността [11]. В тази връзка, интересът към двупосочни GaN ключове (Bidirectional GaN Switches) нараства значително, тъй като те предлагат възможност за провеждане на ток и блокиране на напрежение в две

те посоки, като същевременно запазват характерните предимства на GaN технологията [12].

Двупосочните GaN ключове имат потенциала да променят архитектурата на следващото поколение индустриални електрозадвижвания, позволявайки по-компактни, по-ефективни и по-гъвкави системи [13]. Те отварят пътя към реализиране на инвертори без обемни DC-link кондензатори, матрични преобразуватели с директно AC-AC преобразуване, както и мрежови интерфейси с възможност за пълна рекуперация на енергия [14]. Тези характеристики ги правят особено подходящи за високоефективни приложения като роботизирани системи, електрически превозни средства, автономни енергийни модули и хибридни източници на енергия [15].

Настоящият доклад има за цел да представи систематичен обзор на архитектурите, принципите на работа и приложенията на двупосочните GaN ключове в контекста на индустриалните електрозадвижвания. Анализирани са техните предимства и ограничения спрямо традиционните силициеви и SiC-базирани решения, както и техният потенциал за намаляване на загубите, повишаване на мощностната плътност и подобряване на регенеративните режими. Докладът се основава на актуални изследвания [11], [12], [13] и цели да послужи като теоретична и технологична основа за бъдещи експериментални разработки в рамките на докторантското изследване, посветено на оптимизацията на енергийната ефективност и устойчивостта на модерните системи с електрозадвижвания.

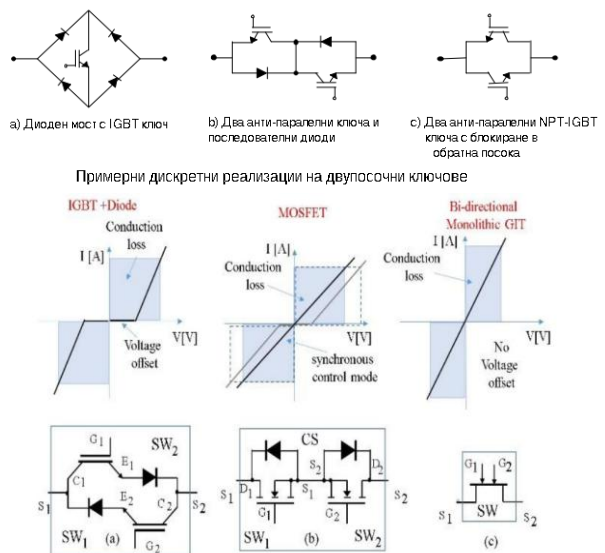
ИЗЛОЖЕНИЕ

Полупроводниците на база GaN принадлежат към групата на широкозоновите материали с висока електрическа якост и ниски загуби при превключване. Основният тип GaN транзистор, използван в силовата електроника, е HEMT (High Electron Mobility Transistor), който

използва двуизмерен електронен газ за постигане на изключително ниско съпротивление в проводящо състояние. Двупосочните GaN ключове (Bidirectional GaN Switches, BDS) позволяват симетрично блокиране на напрежението и двупосочно протичане на тока. Основните архитектури на фигура 1 [6] включват конфигурации back-to-back с общ сорс, common-drain структури и интегрирани двупосочни устройства. Те елиминират нуждата от анти-паралелни диоди, намаляват мъртвото време (dead-time) и опростяват силовите топологии. При индустриални електрозадвижвания тези решения намират приложение в активни токоизправители, рекуперативни инвертори, матрични конвертори и топологии с много нива [3]. Предимствата включват по-висока ефективност, по-компактни филтри и възможност за по-бърза динамика. Все още обаче съществуват предизвикателства, свързани с управлението на гейтовете, топлинното управление и надеждността при високи напрежения.

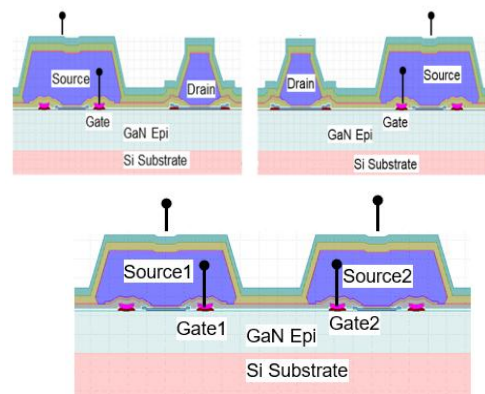
В индустриалните електрозадвижвания двупосочните силови ключове се използват там, където е необходимо управление на енергийния поток в двете посоки – както от източника към товара (моторния режим), така и обратно (рекуперативния режим). Типични примери са регенеративните инвертори, активни двупосочни преобразуватели (AFE) и матричните AC/AC конвертори. Основното изискване към такива ключове е способността едновременно да провеждат ток в двете посоки и да блокират напрежение в двете посоки, без използване на допълнителни анти-паралелни диоди. Това изискване отличава двупосочните елементи от класическите MOSFET или IGBT, при които едната посока на тока се осигурява от вградения диод, който има влошени характеристики в сравнение с активния ключ – основно, по-високи загуби. Двупосочният ключ може да се опише с четири квадранта на работа – положително/отрицателно напреже-

ние и положителен/отрицателен ток. При идеален елемент, токът може да протича във всеки квадрант с минимален пад на напрежение върху ключа. На практика се реализира чрез комбинация от два еднопосочни транзистора, свързани по подходящ начин, като целта е да се минимизират паразитните елементи и сложността на управление.



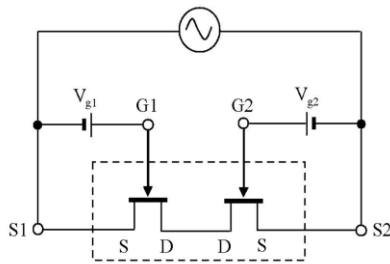
Фиг. 1. Конфигурации на двупосочни ключове

Една от възможните реализации на монолитен двупосочен GaN ключ представлява конструктивно обединение на две GIT (Gate Injection Technology – технология с инжектиране на гейта) GaN структури [8], [12], както е показано на фиг. 2.



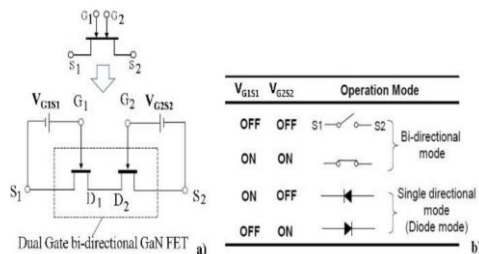
Фиг. 2. Обединение на две структури за получаване на двупосочен ключ

Такъв прибор има два сорса, както и два гейта, всеки от които управлява проводимостта в една от посоките – фиг. 3 [6].



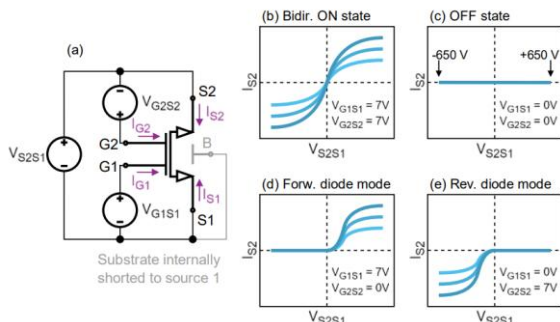
Фиг. 3. Схематично детайлно представяне на концепцията за управление с два гейта

Различните режими на работа на ключа са показани на фиг. 4 [13]



Фиг. 4. Ключови режими на работа

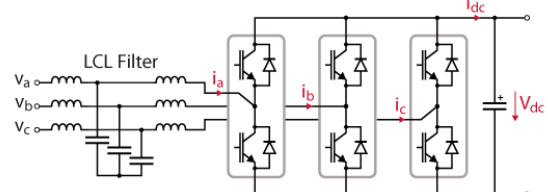
Повече информация за работата на двупосочния GaN ключ се виждат от волт-амперните характеристики на фиг. 5. Приложенията на двупосочните GaN прибори са многобройни – фокусът на този обзор е в по-тясната област на електрозадвижванията (честотни инвертори, векторни сервозадвижвания). Тук ще се спрем на две типични приложения в градация на сложността, като и двете имат голям потенциал за подобряване на енергийната ефективност на индустриалните инсталации.



Фиг. 5. Предавателна характеристика в различните режими на работа

Първата схема са така наречени „Active front-end“ – AC/DC конвертори които заместват класическите диодни изправители, поставяйки си целта да позволят двупосочен трансфер на енергията. В контекста на електрозадвижванията това открива възможност да се използва рекурперираната енергия в спиралните режими и тя да бъде използвана от други консуматори в енергийната мрежа. Същите схеми са добре познати от инверторите използвани в системите за възобновяема енергия (например, соларните инвертори).

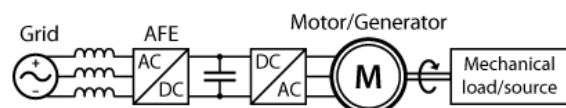
Въпреки сложността си и големият брой активни елементи, тези „изправители“ позволяват постигане на висок фактор на мощността и ниски хармонични изкривявания, комбинирани с двупосочен обмен на енергия [5].



Фиг. 6. Опростена схема на AFE AC/DC конвертор

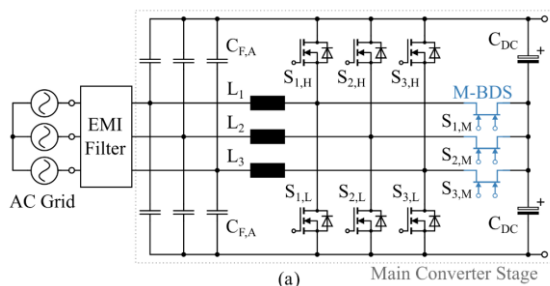
На фиг. 6 е представена опростена схема на класически AFE с 6 ключа [14]. Филтърът на входа (LCL конфигурация) е необходим за блокиране на високочестотните съставлящи в тока поради ключовия режим на работа на приборите.

На фиг. 7 е представена блокова схема, от която се вижда ролята на входния AC/DC конвертор в контекста на електрозадвижване.



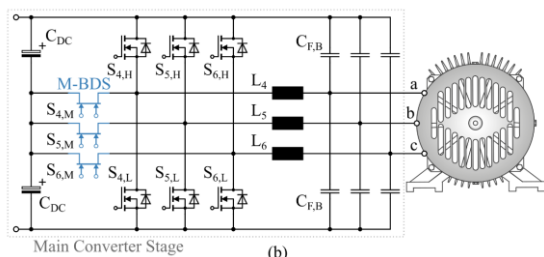
Фиг. 7. Блокове в електрозадвижваща система с мрежово захранване

На фиг. 8 е показана схемата на Т-образен Active Frond-end изправител [14].



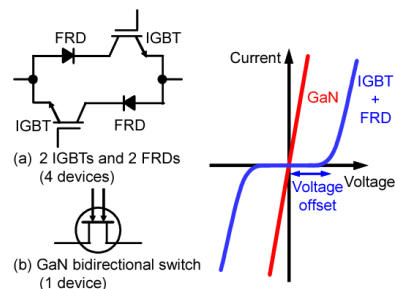
Фиг. 8. T-образен AFE конвертор с три нива

Допълнителните ключове S1m, S3m и S5m, свързани към средната точка на капацитивен делител, позволява конвертора да подава три нива ($+V_{dc}/2$, 0 и $-V_{dc}/2$) и да намали нивото на смущенията, генерирани от превключванията. Това позволява да се използва по-малък входен филтър и да се повиши ефективността, особено в режими с частично натоварване.



Фиг. 9. T-образен DC/AC конвертор с три нива

Възможно е заместването и на основните ключове (S1..S5) с двупосочни GaN ключове с цел намаляване на загубите – от превключване, както и от активните загуби от провеждащите диоди в еднопосочните ключове. Това е валидно за почти всички конверторни топологии, в които паразитните обратни диоди провеждат ток и, съответно, допринасят за загубите на енергия и намаляване на коефициентът на полезно действие. На фиг. 10 е показано сравнение между класически еднопосочен IGBT ключ плюс обратен диод (FRD) и алтернативно решение с двупосочен управляем ключ.



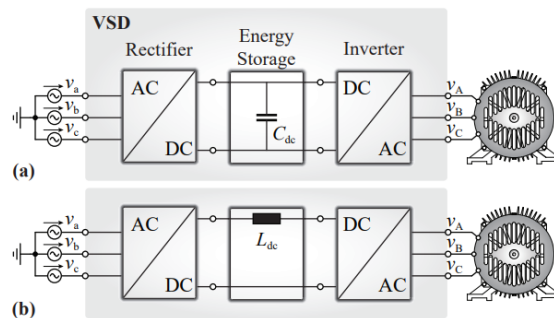
Фиг. 10. IGBT+FRD в сравнение с двупосочен GaN

При генераторни режими на електрическата машина загубите в класическите вътрешни диоди на IGBT/MOSFET са редуцирани чрез активен режим на провеждане на канала на прибора.

При чести генераторни режими, характерни за силно динамични процеси в съвременните индустриални приложения, тази редукция на загубите става значима.

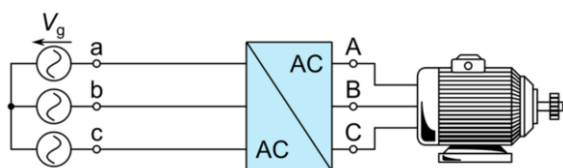
В комбинация с ефективна двупосочна схема на AC/DC преобразувателното звено (като вече представените AFE топологии) това води до предаване на енергията обратно в мрежата и позволява нейното използване от други консуматори. Това е съществено подобрение спрямо съществуващите решения с общ/споделен DC-Link, които ограничават преизползването на рекурперираната енергия само в границите на същия DC-Link сегмент.

Особен интерес в областта на електрозадвижванията представлява използването на двупосочните GaN ключове в по-сложните матрични топологии и заместване на буферния DC Link кондензатор с функционално еквивалентен индуктор.



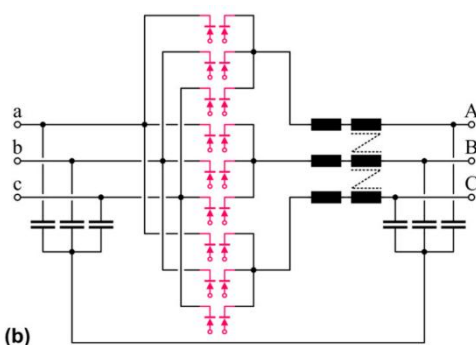
Фиг. 11. Топологии на електрозадвижвания с запасяващ кондензатор и с запасяващ индуктор

На фигура 12 е показана условната блокова схема на директно AC/AC преобразуване за електрозадвижване.



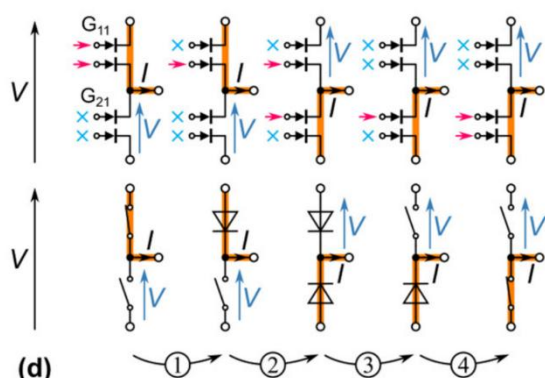
Фиг. 12. Условно означение на блоковете на директно AC/AC задвижване

На практика това може да се постигне чрез директен матричен преобразувател [4], подходящ за електрозадвижващи приложения (фигура 13).



Фиг. 13. Опростена схема на матричен трифазен AC/AC конвертор

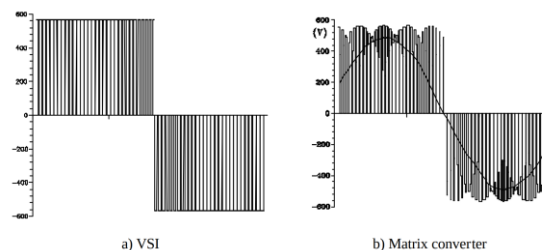
На фигура 14 са представени фазите на управление и проводимост в цикъла на директния матричен преобразувател.



Фиг. 14. Режими на управление/проводимост на директен матричен конвертор

На фигура 15 е показано сравнение на изходното напрежение между Voltage Source Inverter (инвертор източник на

напрежение) и директен матричен преобразувател.



Фиг. 15. Напрежения в изхода на напреженов инвертор (a) и матричен преобразувател (b)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Двупосочните GaN ключове представляват логичен и технологично зрял етап от развитието на силовите полупроводникови устройства, насочен към реализиране на по-висока ефективност и интеграция в електрозадвижванията. Те съчетават високата скорост на превключване и ниските загуби на GaN технологията с възможността за двупосочно управление на енергийния поток. Основните предимства включват елиминиране на анти-паралелните диоди, помалки мъртви времена и опростени схеми. Предизвикателствата са свързани с управлението на затвора, термичната стабилност и стандартизацията на драйверите. Очаква се комбинирани решения, базирани на GaN и SiC, да ускорят прехода към напълно GaN-базирани задвижвания. Двупосочните GaN ключове имат потенциал да се превърнат в основа на следващото поколение интелигентни и енергийно ефективни индустриални системи.

Източник на финансиране: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. Millán, P. Godignon, X. Perpiñà, A. Pérez-Tomás, and J. Rebollo, "A survey of wide bandgap power semiconductor devices," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 5, pp. 2155–2163, May 2014.
- [2] A. Lidow, J. Strydom, M. de Rooij, and D. Reusch, *GaN Transistors for Efficient Power Conversion*, 3rd ed. Chichester, U.K.: Wiley, 2019.
- [3] S. Kouro et al., "Recent advances and industrial applications of multilevel converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 8, pp. 2553–2580, Aug. 2010.
- [4] J. Rodriguez et al., "Matrix converters: A technology review," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 2, pp. 276–288, Apr. 2002.
- [5] M. Liserre, G. Buticchi, M. Andresen, L. De Carne, G. Spiazzi, and J. I. Leon, "The smart transformer: Impact on the electric grid and technology challenges," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 10, no. 2, pp. 46–58, Jun. 2016.
- [6] B. J. Baliga, *Fundamentals of Power Semiconductor Devices*. New York, NY, USA: Springer, 2008.
- [7] D. Graovac, M. Pürschel, and A. Kiep, "MOSFET power losses calculation using the data-sheet parameters," *Infineon Appl. Note*, vol. 1, no. 1, pp. 1–23, Jul. 2006.
- [8] T. P. Chow and R. J. Gutmann, "Recent advances in high-voltage GaN power devices," in *Proc. IEEE Int. Symp. Power Semicond. Devices ICs (ISPSD)*, 2017, pp. 31–34.
- [9] U. K. Mishra, L. Shen, T. E. Kazior, and Y. F. Wu, "GaN-based RF power devices and amplifiers," *Proc. IEEE*, vol. 96, no. 2, pp. 287–305, Feb. 2008.
- [10] W. Y. Wang, O. Lucia, Z. Zhang, S. Gao, Y. Guan, and D. Xu, "A Review of High Frequency Power Converters and Related Technologies," *IEEE Open J. Ind. Electron. Soc.*, vol. 1, pp. 247–260, Sept. 2020.
- [11] Z. Zhang, W. Zhang, F. C. Lee, and Q. Li, "A double-sided cooling structure for GaN power devices with low thermal resistance and low parasitic inductance," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 6, pp. 4634–4637, Jun. 2018.
- [12] H. Wang, J. Wang, G. Li, Z. Zhang, and X. He, "A 1-MHz bidirectional GaN-based CLLC converter with integrated magnetics for electric vehicles," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 11, pp. 10 599–10 611, Nov. 2019.
- [13] R. Hou, J. Lu, and D. Chen, "A 99% efficient 6.6-kW bidirectional GaN-based CLLC converter for electric vehicles," in *Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. (APEC)*, 2020, pp. 1830–1835.
- [14] F. Vollmaier, N. Nain, J. Huber, J. W. Kolar, K. K. Leong, B. Pandya, "Performance Evaluation of Future T-Type PFC Rectifier and Inverter Systems with Monolithic Bidirectional 600 V GaN Switches"
- [15] F. Blaabjerg, Y. Yang, D. Yang, and X. Wang, "Distributed power-generation systems and protection," *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1311–1331, Jul. 2017.