International Scientific Conference 20 UNITECH 26

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
19-21 November 2026
GABROVO

ОПТИМИЗАЦИЯ НА ЧЕСТОТНИТЕ ПРЕОБРАЗУВАТЕЛИ ЗА ЕДНОВРЕМЕННО ПОВИШАВАНЕ НА ЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ И НАДЕЖДНОСТТА

Денис Петков Петков, Продан Иванов Проданов

Технически университет – Габрово, Габрово, България
**кореспондиращ автор: eng.denis.petkov@gmail.com*

Център за компетентност „Интелигентни, мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

EFFICIENCY–RELIABILITY CO-OPTIMIZATION OF VARIABLE FREQUENCY DRIVES

Denis Petkov Petkov, Prodan Ivanov Prodanov

Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria
**Corresponding author: eng.denis.petkov@gmail.com*

Center of competence "Smart mechatronic, eco- and energy-saving systems and technologies"

Abstract
Optimizing the energy efficiency and reliability of variable frequency drives (VFDs) requires a deep understanding of the interplay between semiconductor losses, thermal behavior, and component aging. A fundamental challenge lies in the trade-off between current ripple and switching losses associated with the pulse-width modulation (PWM) switching frequency. This work proposes a system-level co-optimization framework that integrates dynamic electrothermal modeling, temperature-cycle analysis, and lifetime estimation based on mission profiles. Switching frequency, modulation strategy, and cooling conditions are considered as control variables, subject to electrical, thermal, and dynamic performance constraints.The experimental investigation is conducted on a laboratory test bench comprising a Vacon 20 frequency inverter driving an asynchronous motor with a conical rotor. The analysis focuses on the relationship between the reference frequency, the voltage-to-frequency (U/f) ratio, converter losses, and mechanical load. Preliminary short-duration tests are utilized to identify critical operating regimes and to establish an initial experimental foundation for the proposed methodology. However, these tests primarily capture transient thermal processes and do not provide sufficient evidence to quantify long-term component aging or lifetime degradation.The proposed framework establishes a methodological basis for translating measured operating parameters into reliability-aware control strategies. Further long-term experimental studies are required to validate the electrothermal models, quantify the impact of operating conditions on component lifetime, and evaluate the overall effectiveness of the proposed co-optimization approach.

Keywords: variable frequency drive (VFD), Vacon 20, electrothermal modeling, switching losses, temperature cycling, reliability-aware control, lifetime estimation.

ВЪВЕДЕНИЕ

Честотните инвертори (Variable Frequency Drives, VFD) са основен компонент на съвременните регулируеми електрозадвижвания. Чрез управление на честотата и амплитудата на изходното напрежение те позволяват регулиране на скоростта и въртящия момент на асинхронните двигатели в съответствие с динамичните изисквания на технологичния процес. Това е

Print ISSN: 1313-230X, Online ISSN: 3033-1404

от съществено значение при механизми с променлив товар, като помпи, вентилатори, транспортьори и подемно-транспортни машини. Наред с функционалните характеристики, съществено значение придобиват минимизирането на енергийните загуби и осигуряването на висока експлоатационна надеждност на силовата електроника [13, 17, 21].

Енергийната ефективност и надеждността на честотните инвертори са взаимосвързани чрез електротермичните процеси в силовите полупроводникови прибори. Комутационните и проводимостните загуби водят до генериране на топлина, която определя температурното натоварване на компонентите. Продължителното въздействие на високи температури и повтарящи се температурни цикли може да ускори деградацията на полупроводниковите кристали, спойките и бондинг проводниците (bond wires), като по този начин повлияе върху експлоатационния живот на преобразувателя [18, 19, 22, 23]. Съществен фактор за електрическите и топлинните характеристики на инвертора е честотата на широчинно-импулсната модулация (Pulse Width Modulation, PWM). Повишаването на честотата на превключване обикновено намалява токовите пулсации и подобрява хармоничния състав на изходния ток, но води до увеличаване на комутационните загуби. От друга страна, понижаването на честотата може да ограничи тези загуби, но да увеличи токовите пулсации и да повлияе върху качеството на електромагнитните процеси в задвижването [4, 5]. Следователно изборът на оптимален режим изисква отчитане не само на моментните енергийни загуби, но и на тяхното отражение върху температурното натоварване и дългосрочната надеждност на компонентите. Този проблем обосновава необходимостта от подходи за съвместна оптимизация (co-optimization) [1, 14, 16], при които енергийната ефективност и надеждността се разглеждат като взаимосвързани критерии. Изследователската задача се състои в систематизиране на математическите зависимости между електрическите загуби, топлинното поведение и механизмите на стареене, както и в определяне на възможностите за използването им при формиране на стратегии за управление, съобразено с надеждността (reliability-oriented control).

Основната цел на настоящата работа е да систематизира моделите и зависимостите, необходими за съвместна оптимизация на енергийната ефективност и надеждността на честотните инвертори, и да предложи концептуална рамка за управление, съобразено с надеждността и съобразено с експлоатационното натоварване на силовите полупроводникови прибори. Приложният контекст е свързан със задвижваща система, включваща честотен инвертор Vacon 20 и асинхронен двигател с конусен ротор. Разработеният подход има концептуален и методологичен характер: той определя основните етапи на алгоритъма и необходимите зависимости, без да претендира за завършена практическа реализация на адаптивно управление или за експериментално определяне на остатъчния експлоатационен ресурс на конкретното устройство.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Честотният преобразувател като електротермична система. Типичният честотен инвертор (VFD) се състои от входен изправител, междинно постояннотоково звено (DC-link), трифазен инвертор, управляваща електроника и охладителна система. Инверторът синтезира изходно напрежение с необходимите основна честота и амплитуда чрез превключване на силовите полупроводникови прибори. В зависимост от конкретната схемна топология могат да се използват IGBT или MOSFET транзистори, като моделът на загубите трябва да съответства на използваната елементна база и данните от техническата документация на производителя [23].Общите загуби на преобразувателя P_(loss) се определят от израза:

$$P_{loss} = P_{cond} + P_{sw} + P_{DC} + P_{aux} + P_{other}, \quad (1)$$

където Pcond са проводимите загуби в силовите полупроводникови прибори, Psw - комутационните загуби, PDC - загубите в междинното звено, Paux – мощността консумирана от управляващата електроника и охладителната подсистема, а Pother обхваща останалите загуби, включително тези във входния изправител, когато не са отчетени в друг член на баланса. Представената зависимост описва опростен системен енергиен баланс, при който отделните компоненти трябва да бъдат определени без взаимно припокриване. За оценяване на загубите в силовите полупроводникови прибори се използват модели, съобразени с конкретната елементна база и работните условия [23]. При оценка на енергийната ефективност на цялата система е съществено да не се пренебрегват спомагателните консуматори, особено при сравняване на режими с различна интензивност на охлаждане. При опростен линеен модел проводимите загуби за IGBT се оценяват чрез средното напрежение в отпуснато състояние и средния ток, докато за MOSFET често се използва зависимостта:

$$P_{cond} \approx I^2_{RMS,on} R_{DS(on)}(T_j) \quad (2)$$

където $I^2_{RMS,on}$ е ефективната стойност на тока през MOSFET транзистора, отчетена за проводящите интервали в разглеждания период, а RDS(on) е съпротивлението между дрейна и сорса в отпушено състояние, зависещо от температурата на полупроводниковия преход. За IGBT транзистори проводимите загуби могат да бъдат оценени чрез модел на напрежението в проводящо състояние, включващ прагова компонента и диференциално съпротивление. При прецизно електротермично моделиране е необходимо да се използват характеристиките на конкректните полупроводникови прибори, предоставени от производителя [23].

Тъй като тези формули представляват приближения, а реалните загуби зависят от температурата, коефициента на запълване и формата на тока, за прецизни изчисление е необходимо използването на фабрични характеристики (datasheet) или валидиран електротермичен модел [23]. Енергийната ефективност се дефинира като:

$$\eta = P_{out} / P_{in} = P_{out} / (P_{out} + P_{loss}) \quad (3)$$

при условие че входящата (Pin) и изходящата (Pout) мощност се отнасят към една и съща граница на системата. Това отношение показва, че минимизирането на загубите повишава КПД, но само по себе си не отчита температурните цикли и процесите на стареене. Поради това електрическият модел трябва да бъде неразделно свързан с електротермичен и надеждностен модел.

2. Комутационна честота, PWM и енергийна ефективност Комутационните загуби се определят от енергията, разсейвана при процесите на включване и изключване на силовите полупроводници. В първо приближение те могат да се представят чрез:

$$P_{sw} \approx f_{sw} (E_{on} + E_{off}) \quad (4)$$

където fsw е комутационната честота, а E(on) и E(off) са енергиите, разсейвани съответно при включване и изключване на разглеждания силов полупроводников прибор. Тези енергии зависят от тока, напрежението, температурата на прехода и параметрите на управляващия драйвер. За определяне на трифазния инвертор е необходимо да се сумират загубите на отделните прибори, като се отчетат съответните им работни режими и комутационни процеси [23]. При реални експлоатационни условия тези енергии зависят от тока, напрежението, температурата на прехода и драйверните параметри. Повишаването на f(sw) редуцира токовите пулсации $\Delta I \propto 1/f_{sw}$. Посоче-

ната зависимост е приближена и се отнася за съпоставими работни условия при опростен индуктивен модел на товара, но увеличава комутационните загуби. Този антагонизъм е обект на редица изследвания: Wei et al. разглеждат адаптивното управление на PWM честотата като средство за удължаване на експлоатационния живот [5],[12], докато Kwak и Castellazzi анализират избора на модулационна стратегия за ограничаване на електротермичния стрес [4].При синусоидална PWM модулационният индекс (m) определя връзката между управляващия сигнал и основната хармоника на изходното напрежение. Пълният RMS ток включва както основната компонента, така и висшите хармоници.

$$I^2RMS = I1^2 + \sum_{h=2}^{\infty} Ih^2. \quad (5)$$

където I1 е ефективната стойност на основната хармонична компонента, а Ih – ефективната стойност на хармоничната компонента от порядък h. Зависимостта се прилага за периодичен токов сигнал, представен чрез ортогонални хармонични компоненти. Тъй като проводимите загуби са пропорционални на квадрата на тока, повишеното хармонично съдържание увеличава топлинното натоварване дори при постоянна основна компонента. Същевременно качеството на тока се оценява чрез коефициента на хармонични изкривявания (THD). Следователно изборът на f(sw) трябва да удовлетворява едновременно изискванията за токови пулсации, допустим THD, акустичен шум, динамични показатели и електрическо натоварване.

3. Електротермично моделиране

Преобразуването на електрическите загуби в топлина води до повишаване на температурата на полупроводниковия преход Tj. В стационарен режим тя се оценява чрез:

$$Tj \approx Tc + Ploss,device \cdot Rth(j\text{-}c) \quad (6)$$

където Tj температура на полупроводниковия преход, Tc е температурата на корпуса, Ploss,device – сумарните загуби в разглеждания прибор, а Rth(j-c) – термичното съпротивление между преход–корпус. Зависимостта се отнася за стационарен термичен режим [23]. За пълна термична верига се отчитат и съпротивленията корпус–радиатор и радиатор–околна среда. За динамични режими се използват еквивалентни RC мрежи (например във формата на модел на Фостър) [15],[23], при които преходното термично съпротивление се описва чрез сума от експоненциални членове:

$$Zth(t) = \sum_{i=1}^{n} Ri\ (1 - e^{-t/Ti}),\ \tau i = Ri\ Ci. \quad (7)$$

където Ri и Ci са параметрите на еквивалентната термична RC мрежа, а τi са съответните времеконстанти. Моделът позволява описание на преходните температурни процеси при изменение на разсейваната мощност [18, 23]. Чрез конволюция на мощността на загубите с импулсната характеристика на термичната система се определя реалната динамика на температурата [18, 23]. По отношение на инвертора Vacon 20, вътрешно измерената температура на силовия модул е полезен наблюдаем параметър, но не следва да се приема директно за температура на прехода Tj. Необходима е калибрация на модела спрямо динамичните характеристики на вградения сензор.

4. Надеждността на силовия модул не се определя само от максималната температура. Важни са амплитудата на температурния цикъл, средната температура и продължителността на натоварването. За отделен цикъл могат да се дефинират:

$$\Delta T_j = T_{jmax} - T_{jmin}$$

$$T_{\mathrm{jm}} = \frac{\mathrm{T_{j,max}} + \mathrm{T_{j,min}}}{2} \quad (8)$$

където ΔT_j е температурният размах на цикъла, а ΔT_{jm} - неговата средна температура. Тези параметри характеризират термичното натоварване и се използват

при моделиране на термомеханичната умора на силовите полупроводникови модули [22].

Повтарящите се температурни изменения пораждат механична умора поради различните коефициенти на топлинно разширение на материалите. Сред потенциалните механизми са деградация на съединителните проводници (bond wires), умора на спойките и разрушаване на интерфейси в силовия модул [22].

Модели от типа Coffin–Manson свързват броя цикли до отказ с температурната амплитуда, например:

$$Nf = C(\Delta Tj)^{-k} \quad (9)$$

където Nf е прогнозният брой температурни цикли до отказ, ΔTj е температурният размах, а (C) и (k) са емпирични коефициенти, определяни експериментално за конкретния полупроводников модул и разглеждания механизъм на отказ. Представената зависимост е опростена форма на модел за циклична термомеханична умора и не отчита самостоятелно влиянието на средната температура, продължителността на циклите и други експлоатационни фактори. Поради това при оценка на експлоатационния живот е необходимо използването на валидиран модел, съответстващ на конкретната технология [18, 19, 22].

Като конкретният вид и коефициентите зависят от изпитвания компонент и механизма на отказ. Моделът на Arrhenius се използва за температурно ускорени процеси на стареене, но не замества автоматично моделите за циклична термична умора. Не е коректно една универсална зависимост да се прилага към всички механизми на отказ. За Vacon 20 параметрите за lifetime трябва да бъдат взети от данни за конкретния силов модул или от валидирана публикация, съответстваща на технологията и условията на работа.

5. Mission Profile и оценка на експлоатационния живот. Профилът на натоварване (mission profile) описва във времето вариациите на товара, скоростта, въртящия момент и околната температура. Чрез него се изчисляват протичащите токове и загуби във всяка работна точка, а електротермичният модел генерира съответния температурен профил [18,19]. Чрез метода за броене на цикли rainflow counting термичният сигнал се разглобява на отделни цикли, след което с линейното правило на Майнер се изчислява натрупаната повреда:

$$D = \sum_{i=1}^{n} \frac{ni}{Ni} \quad (10)$$

където (D) е безразмерният показател за натрупана повреда, (ni) е броят на реализираните температурни цикли от клас (i), а (Ni) е прогнозният брой цикли до отказ за същия клас, определен чрез избрания модел за експлоатационен живот. При линейното правило на Майнер достигането на (D = 1) се приема за условен критерий за изчерпване на ресурса. Реалният момент на отказ може да се различава поради ограниченията на модела, статистическото разсейване и взаимодействието между отделните механизми на деградация [18, 19].

6. При традиционното управление основните цели са следене на скоростта, момента или тока. Reliability-oriented control [10, 11, 12] добавя към тях информация за температурата, загубите и оцененото натрупване на повреда. В научната литература са предложени и подходи за повишаване на експлоатационния живот на силовата електроника чрез интелигентни алгоритми за управление. При BLDC задвижвания са разглеждани методи, основани на размита логика и оптимизационни алгоритми, насочени към подобряване на експлоатационните характеристики и ограничаване на натоварването на силовите компоненти [6, 7, 8]. Въпреки различията в типа на електрическата машина и структурата на управлението, тези изследвания показват възможности за включване на надеждността като допълнителен критерий при оптимизацията на електрозадвижванията. Концептуално състоянието може да бъде представено чрез $x = [I, fout, Test, D]^t$, където I е токът, fout – из-

ходната честота, Test – оцененото термично състояние, а D – показател за натрупана повреда. Управляващият вектор може да включва u = [fsw, m, sPWM, ucool] t, съответно комутационна честота, модулационен индекс, модулационна стратегия и управление на охлаждането.

Динамичното изменение на състоянието на задвижващата система може да бъде представено в общ дискретен вид чрез зависимостта:

$$X(k+1) = F(x(k), u(k), w(k)) \quad (11)$$

където (x(k)) е векторът на състоянието, (u(k)) – векторът на управляващите въздействия, а (w(k)) – векторът на външните въздействия, включващ механичното натоварване, температурата на околната среда и измененията на захранващото напрежение. Функцията (F) описва прехода между последователните състояния и следва да бъде конкретизирана чрез математическо моделиране и експериментална идентификация. Представената зависимост определя структурата на концептуален модел, без да предполага реализиран адаптивен регулатор. При увеличаване на термичното натоварване системата може да намали fsw, да избере друга модулация или да увеличи охлаждането, ако съответният режим остава в рамките на допустимите електрически и динамични ограничения.

В реализацията за Vacon 20 трябва да се разграничат достъпните параметри от вътрешните величини, които инверторът не предоставя пряко. Ако параметърът f_sw не може да се променя онлайн през използваната конфигурация или интерфейс, адаптивното управление може първоначално да се реализира като offline таблица с допустими настройки или чрез експериментално зададени режими. Не бива да се предполага, че всеки индустриален инвертор позволява всички предложени управляващи променливи да се променят в реално време.

7. Многокритериална оптимизация и охлаждане

Предложената задача е да се минимизират едновременно загубите, температурното натоварване и натрупването на повреда, като се запазят необходимите динамични характеристики и качество на тока. Векторът на критериите може да бъде зададен като:

$$J(u) = [Ploss, Tj,max, D, THD, edyn] \quad (12)$$

където Ploss характеризира енергийните загуби, Tjmax – максималната температура на прехода, D – натрупаната повреда, THD – общото хармонично изкривяване на тока, а edyn – показател за динамичната грешка на задвижването. Критериите се оценяват за предварително зададен работен интервал или експлоатационен профил Възможно е да се използва претеглена целева функция

$$Jw = \sum_{i=1}^{5} wiJi(u) \quad (13)$$

където (wi) са неотрицателни тегловни коефициенти, удовлетворяващи условието $\sum_{i=1}^{5}$, а (Ji) са нормализираните стойности на отделните критерии. Нормализацията е необходима поради различните физически единици и диапазони на изменение на показателите. Изборът на теглата определя относителната значимост на енергийната ефективност, термичното натоварване, надеждността и динамичните характеристики. Като алтернативен подход може да се използва Pareto оптимизация, при която се определя множество от недоминирани решения. но резултатът зависи от нормализацията и избора на теглата. Алтернатива е Pareto оптимизацията, която показва множество решения, между които няма едно, превъзхождащо всички останали по всеки критерий[3, 9].

Оптимизацията трябва да се извършва при ограничения като IRMS ≤ Ilim, Tj,max ≤ Tlim, THD ≤ THDlim, fsw, min ≤ fsw ≤ fsw, max и допустима грешка по скорост или момент. [20]. Границите следва да се определят от техническата документация на Vacon 20, данните на двигателя и изискванията на конкретния

процес, а не чрез произволно избрани стойности.

Охлаждането също трябва да бъде включено в системния баланс. По-интензивното охлаждане може да намали температурата на силовите прибори, но увеличава спомагателната консумация и добавя компоненти със собствен риск от отказ. Следователно целта е да се избере достатъчно, а не непременно максимално охлаждане. Ако няма активно регулируемо охлаждане, тази променлива се изключва от практическата оптимизация, като се запазва като параметър на термичния модел, [1, 2].

8. Експериментален контекст: Задвижване с Vacon 20 Практическата база на изследването е лабораторно задвижване с честотен инвертор Vacon 20, управляващ асинхронен двигател с конусен ротор в отворен контур по скаларен закон V/f. Експерименталната матрица включва 30 комбинации (5 нива на механичен товар от 0 до 100% и 6 нива на честота от 5 до 50 Hz).Резултатите от кратките 10-секундни тестове показват пикови токове до 4.48 A (при номинален ток на инвертора 3.3 A), докато вътрешната температура на модула остава в диапазона 31–37 °C. Наблюдаваните стойности показват, че в рамките на краткотрайните изпитвания повишеното токово натоварване не е съпроводено с пропорционално и непосредствено изменение на измерваната вътрешна температура. Това поведение е съвместимо с наличието на значителна топлинна инерция на силовия модул и неговата охладителна система. Следва обаче да се отчете, че измерваната вътрешна температура не представлява директно температурата на полупроводниковия преход. Поради ограничената продължителност на изпитванията получените резултати не позволяват определяне на пълната термична динамика, натрупаната повреда или остатъчния експлоатационен ресурс на преобразувателя. За количествена оценка на тези показатели са необходими продължителни измервания, идентификация на електротермичния модел и прилагане на валидиран модел за експлоатационен живот. Тези данни служат като отправна точка и мотивация за разработване на рамката, доказвайки необходимостта от дългосрочни изпитвания до пълно термично установяване.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Енергийната ефективност и надеждността на честотните преобразуватели са свързани чрез проводимите и комутационните загуби, температурното поведение и механизмите на стареене. Повишаването на PWM честотата може да подобри качеството на тока, но обикновено увеличава комутационните загуби; намаляването ѝ има обратния ефект и може да доведе до по-големи пулсации. Поради това работната точка, модулационната стратегия и термичното състояние трябва да се разглеждат съвместно.

В работата е формулирана концептуална рамка, която свързва оценката на загубите с динамичен електротермичен модел, анализ на температурните цикли, mission-profile-based lifetime оценка и многокритериален избор на управляващи параметри. Контекстът на лабораторно задвижване с Vacon 20 показва значението на едновременното наблюдение на тока, зададената честота, натоварването и температурата. Кратките измервания са полезни за идентифициране на режими с повишено моментно натоварване, но не са достатъчни за количествено прогнозиране на експлоатационния живот.

Следващата стъпка е да се проведат по-продължителни и повторяеми изпитвания, да се калибрира електротермичният модел и да се избере lifetime модел с параметри, приложими към конкретния силов модул. Едва след тази валидация може да бъде оценено количествено дали адаптивният избор на комутационна честота и модулация осигурява реален компромис между ефективност, динамика и надеждност.

БЛАГОДАРНОСТИ: *Авторите изказват благодарности на рецензентите*

за полезните критични бележки и препоръки при оформянето на доклада. 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] Habib, K., Xu, X., Ling, H., Khan, S., “Enhancing Variable Frequency Drive Efficiency through Advanced Control and Thermal Management,” Thermal Science and Engineering Progress, vol. 73, 104665, 2026, doi: 10.1016/j.tsep.2026.104665.

[2] Habib, K., Wadood, A., Khan, S., et al., “Enhancing Variable Frequency Drive Efficiency Using Fractional Hybrid Particle Swarm Optimization and Comprehensive Thermal Management,” Scientific Reports, vol. 16, 11843, 2026, doi: 10.1038/s41598-026-38644-y.

[3] “Optimum Control and Thermal Management of Varying Operating Conditions of Variable Frequency Drives,” International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 252, 127496, 2025, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127496.

[4] Kwak, J., Castellazzi, A., “Electro-Thermal Stress Minimisation of Motor-Drive Inverter Switches by Hybrid Modulation Strategy Technique,” Microelectronics Reliability, vol. 150, 115221, 2023, doi: 10.1016/j.microrel.2023.115221.

[5] Wei, L., McGuire, J., Lukaszewski, R. A., “Analysis of PWM Frequency Control to Improve the Lifetime of PWM Inverter,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 47, no. 2, pp. 922–929, 2011, doi: 10.1109/TIA.2010.2103391.

[6] Jegajothi, B., Geethamahalakshmi, G., Raja, A., Mahendran, N., “An Efficient Metaheuristic Optimization Based Fuzzy Controller for Brushless DC Drives Lifetime Expansion,” Materials Today: Proceedings, vol. 56, part 6, pp. 3343–3348, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.10.176.

[7] García López, M., Ponce, P., Soriano, L. A., Molina, A., Rodriguez, J. J., “Improvement of Lifetime in the Power Electronic Drive of a BLDCM through the Optimization of Fuzzy Logic Control,” Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, vol. 16, no. 1, pp. 66–78, 2019, doi: 10.4995/riai.2018.9078.

[8] García, M., Ponce, P., Soriano, L. A., Molina, A., MacCleery, B., Romero, D., “Lifetime Improved in Power Electronics for BLDC Drives Using Fuzzy Logic and PSO,” IFAC-PapersOnLine, vol. 52, no. 13, pp. 2372–2377, 2019, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.11.561.

[9] Chen, C., et al., “Reinforcement Learning-Based Weighting Factors Auto-Tuning for Thermal Management in Assembled Inverters,” Microelectronics Reliability, 2026. Bibliographic details should be verified before final submission.

[10] Rezaeizadeh, A., Mastellone, S., “Optimal Current Control Strategy for Reliable Power Electronics Converters: Frequency-Domain Approach,” arXiv:2505.06922, 2025.

[11] Gajanur, N., Abbaszada, M. A., Mazumder, S. K., “Real-Time Reliability-Centric Control for SiC MOSFETs in H-ANPC Inverters,” Microelectronics Reliability, vol. 185, 116261, 2026, doi: 10.1016/j.microrel.2026.116261.

[12] Eren, E., Kaya, H., Ozturk, S. B., “Extend the Lifetime of Power Components in Series DC Motor Drives Using ANN-Based Adaptive Switching Frequency Optimization,” Sensors, vol. 25, no. 22, 6996, 2025, doi: 10.3390/s25226996.

[13] Vernica, I., Wang, H., Blaabjerg, F., “Design for Reliability and Robustness Tool Platform for Power Electronic Systems—Study Case on Motor Drive Applications,” 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2018, doi: 10.1109/APEC.2018.8341261.

[14] Ahooye Atashin, S., Peyghami, S., Davari, P., Chopade, A. R., Hanigovszki, N., Blaabjerg, F., “A System-Level Design for Reliability of Integrated Motor Drives,” 2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2024, doi: 10.1109/ICEM60801.2024.10700144.

[15] Atashin, S. A., Zhang, K., Peyghami, S., Davari, P., Blaabjerg, F., “Early-Stage Design for Reliability Assessment Considering Electrothermal Modeling in High-Speed Integrated Motor Drives,”

Applied Sciences, vol. 16, 7507, 2026, doi: 10.3390/app16157507.
[16] Burgos, R., Chen, G., Wang, F., Boroyevich, D., Odendaal, W. G., Van Wyk, J. D., "Reliability-Oriented Design of Three-Phase Power Converters for Aircraft Applications," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 48, no. 2, pp. 1249–1263, 2012, doi: 10.1109/TAES.2012.6178060.
[17] "A Reliability-Oriented Design Method for Power Electronic Converters," 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2013, doi: 10.1109/APEC.2013.6520713.
[18] Ma, K., Liserre, M., Blaabjerg, F., Kerekes, T., "Thermal Loading and Lifetime Estimation for Power Device Considering Mission Profiles in Wind Power Converter," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 2, pp. 590–602, 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2312335.
[19] Mussallam, M., Yin, C., Bailey, C., Johnson, C. M., "Mission Profile-Based Reliability Design and Real-Time Life Consumption Estimation in Power Electronics," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 5, pp. 2601–2613, 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2358555.
[20] Vernica, I., Ma, K., Blaabjerg, F., "Optimal Derating Strategy of Power Electronics Converter for Maximum Wind Energy Production with Lifetime Information of Power Devices," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 6, no. 1, pp. 267–276, 2018, doi: 10.1109/JESTPE.2017.2745714.
[21] Yang, S., Bryant, A., Mawby, P., Xiang, D., Ran, L., Tavner, P., "An Industry-Based Survey of Reliability in Power Electronic Converters," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 47, no. 3, pp. 1441–1451, 2011, doi: 10.1109/TIA.2011.2124436.
[22] Durand, C., Klingler, M., Coutellier, D., Naceur, H., "Power Cycling Reliability of Power Module: A Survey," IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, vol. 16, no. 1, pp. 80–97, 2016, doi: 10.1109/TDMR.2016.2516044.
[23] Ma, K., Bahman, A. S., Beczkowski, S., Blaabjerg, F., "Complete Loss and Thermal Model of Power Semiconductors Including Device Rating Information," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 5, pp. 2556–2569, 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2352341.