

基于改进蛇群算法的混合三电平 DAB 变换器 电流应力优化策略*

刘春喜 徐 辰 李 磊 常洪赫

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院 葫芦岛 125105)

摘 要:针对二极管钳位型混合三电平双有源桥变换器的电流应力优化与变换器的效率提高存在的难题,设计了一种基于双重移相控制的最小电流应力优化控制方案,利用改进的蛇群优化算法搜索满足电流应力最小化的最佳移相组合。首先,针对蛇群优化算法中存在易陷入局部最优、参数敏感性强等问题,通过引入北方苍鹰算法的捕食机制以增强全局搜索能力并降低参数敏感性,有效增强了算法的全局搜索能力与收敛稳定性,从而提高最优移相组合的搜索精度;通过在惩罚函数中引入基于电流应力、功率以及电压偏差等多种约束条件,进一步缩小了搜索范围。最后,通过搭建仿真平台并结合实验验证,结果为所提出的控制方法相较于拉格朗日乘子法在低功率时电流应力降低了 24%,在高功率时降低了 13%,结果表明所提出的改进策略有效减小了电流应力验证了所提控制方法的可行性,有效降低电流应力并改善能量传输特性。

关键词: 混合三电平双有源桥变换器;双重移相控制;改进蛇群优化;电流应力

中图分类号: TM46 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4031

Current stress optimization strategy for hybrid three-level DAB converter based on the improved snake swarm algorithm

Liu Chunxi Xu Chen Li Lei Chang Honghe

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: To address the challenges of current stress optimization and efficiency improvement in diode-clamped hybrid three-level dual active bridge converters, this study proposes a dual-phase-shifting control scheme based on minimum current stress optimization. The improved snake swarm optimization algorithm is employed to search for optimal phase-shifting combinations that minimize current stress. First, to overcome the snake swarm algorithm's susceptibility to local optima and high parameter sensitivity, the Northern Condor Algorithm's predation mechanism is introduced to enhance global search capability and reduce parameter sensitivity, thereby improving convergence stability and search accuracy for optimal phase-shifting combinations. Additionally, constraint conditions based on current stress, power, and voltage deviations are incorporated into the penalty function to further narrow the search range. Experimental validation through simulation platforms demonstrates that the proposed control method reduces current stress by 24% at low power levels and 13% at high power levels compared to the Lagrange multiplier method. These results confirm the effectiveness of the improved strategy in minimizing current stress, validating the feasibility of the proposed control approach, and enhancing energy transfer characteristics.

Keywords: hybrid three-level dual active bridge converter; dual phase shift control; ISO; current stress

0 引 言

随着可再生能源的大规模并网和新型电力系统的快速发展,直流微电网因其高效、灵活的特点成为现代电力

系统的重要发展方向。在直流微电网架构中,双有源桥(dual active bridge, DAB)变换器凭借其独特的拓扑结构和控制特性,展现出显著的技术优势^[1-3]。DAB 变换器不仅具备双向功率传输能力,还能实现宽电压范围的高效能量转换,同时通过移相控制策略可精确调节功率

流向和大小^[4-5]。这些特性使 DAB 变换器成为直流微电网中实现电压调节、功率平衡和能量管理的理想选择,为构建高可靠性、高效率的直流配电系统提供了关键技术支撑。

传统的两电平 DC/DC 变换器在应对功率波动、快速负载变化时,其性能往往受到限制造成过大的电流应力和功率损耗,无法应对负载突变带来的电压波动。而三电平 DAB 变换器,相较于传统的两电平变换器具有较高的电流承载能力,能保持较低的功率损失和较高的效率^[6-10]。文献[11]设计了一种混合三电平电流馈电串联谐振双向 DC-DC 变换器。但所用控制算法复杂、宽电压范围效率优化不足等缺点,影响实际工程应用。文献[12]提出了一种针对中点钳位三电平双有源桥变化器的零电压开关(ZVS)模型控制策略,使得输出电压能够快速稳定,也降低了开关管的损耗。

在 DAB 变换器中,控制方式直接影响着系统的性能。主要包括双重移相控制、单移相控制、扩展移相控制和三重移相控制。单移相控制是最基本的控制方法,只能调节桥臂的开关时序,控制范围较为有限;而双重移相控制不仅调节桥臂的开关时序,还通过控制两个桥臂之间的相位差,提供更高的自由度,从而实现更精细的功率调节^[13-14]。文献[15]提出改进扩展移相控制,通过在某一 H 桥内增加内移相角进行控制,提高控制灵活度,但是通常需要较长的调节时间,尤其是在负载突变时,控制系统可能存在响应延迟。文献[16]对三重移相控制进行研究,提出了一种单边非对称三重相移的调制策略,从而降低 RMS 电感电流,同时扩大软开关范围。相比于双重移相控制更加灵活,但计算和控制复杂度较高。

为了保证变换器高效率的运行,在变换器工作时应该保证电流应力尽可能最小。文献[17]提出了一种组合双重移相控制策略,通过结合双重内移相与交错双重移相来优化在变换器电压不匹配时的电流应力,从而提升传输效率。但其控制策略较为复杂,并且计算量较大;文献[18]创新性地将滑模控制与电流应力优化相结合,采用超螺旋算法有效抑制了传统滑模控制的抖振问题,显著提升了系统的动态响应速度和效率,然而控制参数的整定过程较为复杂;文献[19]在三重移相控制中引入 KKT 最优性条件进行优化电流应力设计,同时引入虚拟电压补偿来提高动态性能。但其计算复杂度较高,对处理器性能要求严格;文献[20]针对降压-升压工作模式提出了一种新型扩展移相调制策略,通过精确的模式划分和拉格朗日优化方法有效降低了电流应力,但在模式切换过程中存在暂态性能下降的问题;文献[21]对单级式 AC-DC 变换器提出了线性化变频移相控制策略,在简化控制结构的同时拓宽了 ZVS 工作范围,但输出电压调节精度有待提高;文献[22]建立了以电流有效值最小为

目标的极值优化问题,采用基于 Karush-Kuhn-Tucker 条件的优化方法同时考虑 DAB 变换器的 ZVS 特性,然而优化结果的实时性受到算法收敛速度的限制。因此,有待提出一种更有效、更易实现的电流应力优化方法。

在 DAB 变换器中引入三电平结构,以二极管钳位型混合三电平双有源桥(NPCH3L-DAB)变换器作为研究对象,以减小电流应力为目标。首先,在双重移相控制策略下,系统分析变换器在不同工作模式下的电流应力特性和功率传输特性。然后,在此基础上构建多角度约束条件和目标函数,进而提出一种改进蛇群算法的电流应力优化策略,通过搜索最优移相比组合,使得变换器电流应力最小。最后,通过搭建仿真和实验平台,验证所提出优化方法的准确性。

1 混合三电平双有源桥变换器双重移相控制电流应力特性分析

1.1 双重移相控制工作原理

采用二极管钳位型混合三电平拓扑结构,通过在三电平全桥逆变侧与两电平半桥整流侧之间引入辅助电感 L 和变压器漏感构成的谐振网络,显著提升系统的性能。

如图 1 所示,拓扑结构包含以下关键组成部分: V_1 、 V_2 表示变换器输入和输出端电压,逆变侧采用三电平全桥架构 H_1 桥,由开关管 $S_1 \sim S_8$ 及钳位二极管 $D_9 \sim D_{12}$ 构成;整流侧为两电平半桥结构 H_2 桥,由开关管 $Q_1 \sim Q_4$ 及其体二极管 $M_1 \sim M_4$ 组成;直流母线配置均压电容 C_1 、 C_2 及支撑电容 C_3 以维持电压稳定, L 代表辅助电感和变压器归算到逆变侧的漏感总和。变压器变比 $n:1$ 的设计进一步优化了功率传输特性,显著减小导通损耗。

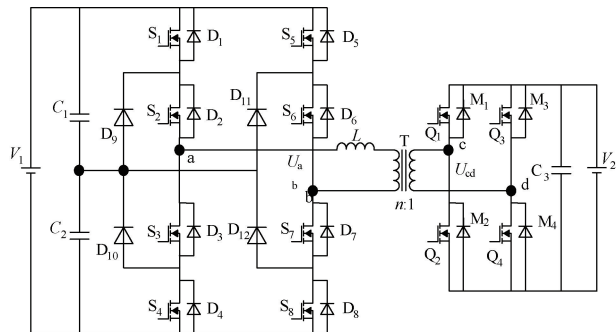


图 1 三电平双有源桥 DC-DC 变换器

Fig. 1 Three-level dual active bridge DC-DC converter

由变换器的波形如图 2 所示,其中 T 为开关周期; U_{ab} 、 U_{cd} 分别为初级 H 桥 a 、 b 两点间的电压和次级 H 桥 c 、 d 两点折算到初级 H 桥的电压。 I_L 为辅助电感上的电流。电压转换比 $k = V_1/nV_2$;双重移相控制下采用两个相

移变量,分别为 D_1 和 D_2 ,根据 D_1 和 D_2 的不同取值,可以分为以下 4 种情况。

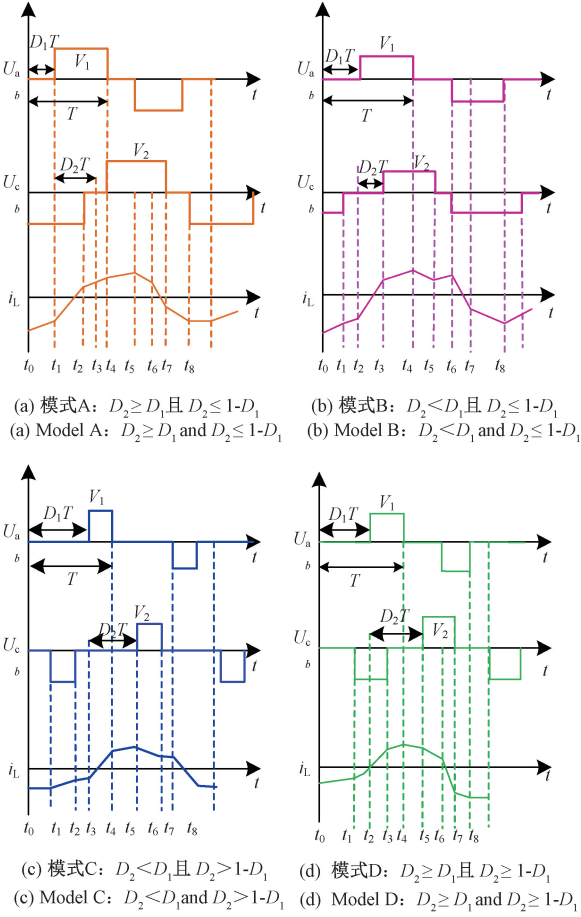


图2 双重移相控制不同工作模式波形

Fig. 2 Waveform diagrams of dual-phase-shift control in different working modes

1.2 不同工作模式下电流应力特性分析

由图2可知,可以把双重移相控制分为4种工作模式。当变换器工作在模式A: $D_2 \geq D_1$ 且 $D_2 \leq 1-D_1$ 时达到稳定之后,电感电流满足 $i_L(t) = -i_L(t+T)$,可以得到电感电流为:

$$\begin{cases} i_L(t_0) = -\frac{nV_2}{4fL}(k(1-D_1) + 2D_2 + D_1 - 1) \\ i_L(t_1) = -\frac{nV_2}{4fL}(k(D_1 - 1) + D_1 - 2D_2 + 1) \\ i_L(t_2) = -\frac{nV_2}{4fL}(k(-D_1 + 2D_2 - 1) - D_1 + 1) \\ i_L(t_3) = -\frac{nV_2}{4fL}(1 - D_1 + k(2D_2 + D_1 - 1)) \end{cases} \quad (1)$$

当变换器工作模式B时达到稳定之后,可以得到各时刻的电感电流为:

$$\begin{cases} i_L(t_0) = -\frac{nV_2}{4fL}(k(1-D_1) + 2D_2 + D_1 - 1) \\ i_L(t_1) = -\frac{nV_2}{4fL}(k(D_1 - 1) + D_1 - 1) \\ i_L(t_2) = -\frac{nV_2}{4fL}(k(D_1 - 1) + D_1 - 1) \\ i_L(t_3) = -\frac{nV_2}{4fL}(1 - D_1 + k(2D_2 + D_1 - 1)) \end{cases} \quad (2)$$

当变换器工作模式C时达到稳定之后,可以得到各时刻的电感电流为:

$$\begin{cases} i_L(t_0) = -\frac{nV_2}{4fL}(k(1-D_1) - D_1 + 1) \\ i_L(t_1) = -\frac{nV_2}{4fL}(k(-D_1 + 1) - D_1 + 1) \\ i_L(t_2) = -\frac{nV_2}{4fL}(k(-D_1 + 1) - D_1 + 2D_2 - 1) \\ i_L(t_3) = -\frac{nV_2}{4fL}(-1 + D_1 + k(-2D_2 + D_1 + 1)) \end{cases} \quad (3)$$

当变换器工作在模式D时达到稳定之后,可以得到各时刻的电感电流为:

$$\begin{cases} i_L(t_0) = -\frac{nV_2}{4fL}(k(1-D_1) - D_1 + 1) \\ i_L(t_1) = -\frac{nV_2}{4fL}(k(-D_1 + 1) - D_1 + 1) \\ i_L(t_2) = -\frac{nV_2}{4fL}(k(-D_1 + 1) + D_1 - 1) \\ i_L(t_3) = -\frac{nV_2}{4fL}(-1 + D_1 + k(-D_1 + 1)) \end{cases} \quad (4)$$

电流应力指电感在一个开关周期内流过的最大电感电流值,可以表示为:

$$I_{\max} = \max\{|I_L(t)|\} \quad (5)$$

电流应力标么值为:

$$G = \frac{I_{\max}}{I_N} \quad (6)$$

式中: I_N 为基准值具体表示为:

$$I_N = \frac{nU_2}{8fL} \quad (7)$$

由图2可知,工作在模式A时,最大电感电流位于 t_5 时刻,则在 t_5 时刻电感电流表示为:

$$i_L(t_5) = \frac{nV_2}{4fL}(k(-D_1 + 1) + D_1 + 2D_2 - 1) \quad (8)$$

由式(8)可得当前电流应力表示为:

$$G = \frac{I_L(t_5)}{I_N} = 2[k(-D_1 + 1) + D_1 + 2D_2 - 1] \quad (9)$$

同理,可得其他模式下的电流应力表达式为:

$$G = 2[(k-1)(1-D_1) + 2D_2] \quad (10)$$

$$G = 2(k+1)(1-D_1) \quad (11)$$

电流应力与移相比之间的曲线如图 3 所示。

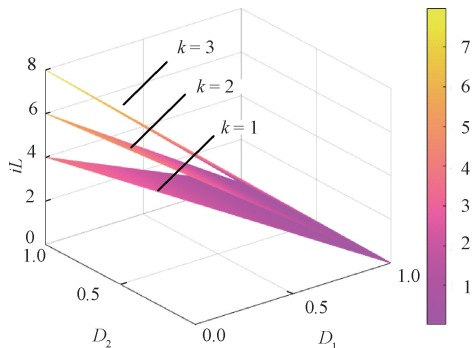


图 3 模式 A 和模式 B 的电流应力

Fig. 3 The current stress of mode A and mode B

由图 3 可得,电流应力随电压转换比 k 的增加而增加。

在一个周期内,将变压器原边全桥输出电压与输出电流乘积的积分定义为传输功率,其可表示为:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T U_{ab} i_L(t) dt \quad (12)$$

根据传输功率的定义可得变换器在双重移相控制下 4 种模式的传输功率为:

$$\begin{cases} P = \frac{nV_1V_2}{4fL}(2D_2 - 2D_2^2 - D_1^2) \\ P = \frac{nV_1V_2}{4fL}(2D_2 - 2D_1D_2^2 - D_2^2) \\ P = \frac{nV_1V_2}{4fL}((1-D_2)(D_2 - 2D_1 + 1)) \\ P = \frac{nV_1V_2}{4fL}(1-D_1)^2 \end{cases} \quad (13)$$

而传输功率的标么值为:

$$P = \frac{nU_1U_2}{8fL} \quad (14)$$

进一步推出标么化后的功率为:

$$\begin{cases} P = (4D_2 - 4D_2^2 - 2D_1^2) \\ P = (4D_2 - 4D_1D_2^2 - 2D_2^2) \\ P = 2(1-D_2)(D_2 - 2D_1 + 1) \\ P = 2(1-D_1)^2 \end{cases} \quad (15)$$

根据式(15)绘制了变换器功率随移相比变化的曲线如图 4 所示。由图 4 可知,变换器存在多种移相比满足给定传输功率。因此,选择利用更灵活的双重移相控制方式。

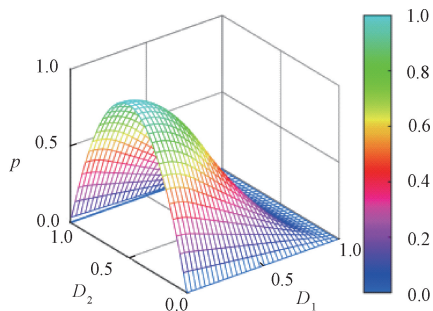


图 4 双重移相控制下功率传输范围

Fig. 4 Power transmission range under dual phase-shift control

2 电流应力优化方案

2.1 改进蛇群优化算法

在针对混合三电平双有源桥变换器的电流应力优化问题中,传统算法如遗传算法、粒子群算法等容易陷入局部最优,且对参数依赖性较强等问题。而蛇群优化算法相较于传统算法通过模拟蛇类觅食的全局探索与局部开发平衡,自适应处理约束以及更强的非线性优化能力、更高效地探索移相角的最优组合^[23],尤其在多约束条件下表现更优。

算法初始化时生成均匀分布的随机移相角组合作为初始种群,每个个体代表一组可能移相角的解。通过模拟蛇群的觅食与交配行为,算法动态调整移相角参数,在满足电路功率传输需求的约束条件下,逐步逼近最优解。这一过程能够有效解决传统控制方法在复杂工况下难以实现动态优化的问题,为 DAB 变换器的高效运行提供了一种智能化的参数整定方案。初始种群公式如式(16)所示。

$$X_i = X_{\min} + r \times (X_{\max} - X_{\min}) \quad (16)$$

式中: X_i 为第 i 个个体的位置; r 为 $[0,1]$ 的随机数; $X_{\min}$ 和 $X_{\max}$ 分别为位置的下界和上界。

将蛇种群分为雄性和雌性相等的两组,雄性数量 N_m 为 50%,雌性数量 N_f 为 50%。评估每一组,并定义温度和食物数量。温度 T 和食物量 Q 如式(17)所示。

$$\begin{cases} T = m \times \exp\left(\frac{-t}{T_{\max}}\right) \\ Q = c_1 \times \exp\left(\frac{t - T_{\max}}{T_{\max}}\right) \end{cases} \quad (17)$$

式中: $m = 1$; $c_1 = 0.5$; t 为当前的迭代次数; $T_{\max}$ 为最大的迭代次数。

如果 $Q < 0.25$ (0.25 为阈值),蛇类通过选取任意随机机位置进行食物搜索,并对其位置进行更新,如式(18)所示。

$$\begin{aligned}
X_{i,m}^{(t+1)} &= X_{rand,m}^{(t)} \pm c_2 \times A_m \times \\
&[(X_{\max} - X_{\min}) \times r + X_{\min}] \\
X_{i,f}^{(t+1)} &= X_{rand,f}^{(t)} \pm c_2 \times A_f \times \\
&[(X_{\max} - X_{\min}) \times r + X_{\min}]
\end{aligned} \quad (18)$$

式中: $X_{i,m}^{(t+1)}$ 为第 $t+1$ 次迭代雄性蛇的位置; $X_{i,f}^{(t+1)}$ 为第 $t+1$ 次迭代雌性蛇的位置; $X_{rand,m}^{(t)}$ 为第 t 次迭代随机选择的雄性蛇的位置; $X_{rand,f}^{(t)}$ 为第 t 次迭代随机选择的雌性蛇的位置; r 为 $[0,1]$ 的随机数; c_2 为 0.05; A_f 为雌性寻找食物的能力; A_m 为雄性寻找食物的能力。

在 $Q > 0.25$ 的条件下,如果 $T > 0.6$,温度处于热状态。蛇只会寻找食物,位置更新公式如式(19)所示。

$$X_{i,j}^{(t+1)} = X_{food} \pm c_3 \times T \times (X_{food} - X_{i,j}^{(t)}) \times r \quad (19)$$

式中: $X_{i,j}^{(t+1)}$ 为第 $t+1$ 次迭代蛇的位置; X_{food} 为蛇的最佳位置; c_3 为 2。在 $Q > 0.25$ 的条件下,如果 $T < 0.6$,温度处于冷状态。蛇将处于战斗模式或交配模式。

而传统蛇群算法在后期容易因种群多样性下降而陷入局部最优的问题,其他算法如遗传算法的交叉变异操作或蚁群算法的信息素更新会引入额外计算负担,而北方苍鹰的捕猎行为提供了一种动态调整搜索策略的生物学依据:当苍鹰锁定目标后,猎物会尝试逃离,但苍鹰仍能以高速俯冲精准捕获^[24]。这一特性可映射到 DAB 移相角优化问题中,即在算法接近最优解时,通过模拟苍鹰的快速逼近机制,使搜索个体能够更高效地调整移相角组合,能够有效避免算法过早陷入局部最优。将当前最优移相角组合(D_1, D_2)视为“苍鹰”,其他候选解作为“猎物”,通过动态调整攻击半径 R 和自适应步长 ΔD ,使搜索过程既能保持全局探索能力(猎物逃逸机制),又能快速逼近最优解(苍鹰追击机制)。其中, R 与 DAB 的移相角约束范围相关联并随迭代收缩, ΔD 则根据目标函数改善程度自适应调整,实现移相角的高效优化。

引入北方苍鹰第 1 阶段位置更新公式对蛇群优化算法的位置更新公式进行改进。

$$P_i = X_k \quad i = 1, 2, \dots, k = 1, 2, \dots, i-1, \dots, N \quad (20)$$

$$F_M = \exp\left(\frac{-f_{best,f}}{f_i}\right) \quad (21)$$

$$F_F = \exp\left(\frac{-f_{best,m}}{f_i}\right)$$

式中: $f_{best,f}$ 为雌蛇组中的最佳位置 $X_{best,f}$ 的适应度值; $f_{best,m}$ 为雄蛇组中的最佳位置 $X_{best,m}$ 的适应度值; f_i 为蛇个体的适应度值。

$$\begin{aligned}
X_{i,m}^{(t+1)} &= X_{i,m}^{(t)} + c_3 \times F_M \times r_{rand} \times (X_{best,f} - I \times X_{i,m}^{(t)}) \\
X_{i,f}^{(t+1)} &= X_{i,f}^{(t)} + c_3 \times F_F \times r_{rand} \times (I \times X_{best,m} - X_{i,f}^{(t)})
\end{aligned} \quad (22)$$

式中: $X_{best,f}$ 为雌蛇组中的最佳位置; $X_{best,m}$ 为雄蛇组中的最佳位置; F_M 为雄性战斗能力; F_F 为雌性战斗能力; I 为 1 或 2 的随机整数。

第 2 阶段,当北方苍鹰锁定并发起对猎物的攻击时,猎物出于本能会设法逃离。但苍鹰仍以较快的速度捕获它。假设此猎物在半径为 R 的攻击位置,该阶段的数学模型:

$$R = 0.02 \times \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad (23)$$

$$\begin{aligned}
X_{i,m}^{(t+1)} &= X_{i,m}^{(t)} + R \times (2 \times r - 1) X_{i,m}^{(t)} \\
X_{i,f}^{(t+1)} &= X_{i,f}^{(t)} + R \times (2 \times r - 1) X_{i,f}^{(t)}
\end{aligned} \quad (24)$$

式中: t 为当前迭代次数; T 为最大迭代次数。

改进蛇群优化算法的最优移相角组合如图 5 所示。

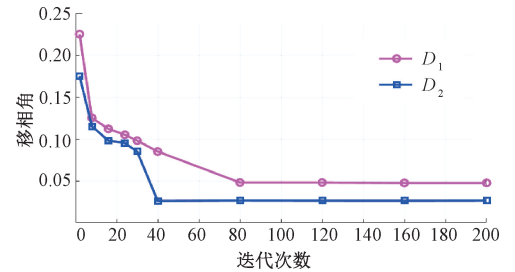


图 5 最优移相角组合

Fig. 5 Optimal phase-shifting angle combination diagram

2.2 目标函数

目标函数的设计需要考虑系统运行的多种条件并不能只考虑电流应力。因此除电流应力外还需要考虑系统工作的一些实际情况。首先,功率传输能力是变换器的核心功能指标,必须确保系统能够精确跟踪给定的功率指令;其次,输出电压稳定性直接关系到负载设备的正常工作,是系统可靠性的重要保障;再者,移相量 D_1 和 D_2 之间的协同关系不仅影响开关器件的电流应力分布,还决定了系统的动态响应特性。这 3 个因素相互耦合、彼此制约,共同决定了变换器的整体性能。因此,在改进蛇群优化算法的目标函数设计中,将 4 种因素同时考虑进惩罚函数的设计中,能大大减小了最优移向角的搜索范围,更加快速准确地找的最优移向角组合。

由第 1 节可得,以双重移相控制的模式 A 下,此时变换器的电流应力表示为:

$$G = \frac{I_L(t_s)}{I_N} = -2[k(D_1 - 1) - D_1 - 2D_2 + 1] \quad (25)$$

通过上述分析,可以将电流应力优化问题转化成数学问题,目的是找到不等式约束条件下函数的极值,根据式(25)可得电流应力约束条件为:

$$\begin{cases} P = (4D_2 - 4D_2^2 - 2D_1^2) = P^* \\ 0 \leq D_1 \leq 1, 0 \leq D_2 \leq 1 \\ D_1 \leq D_2, D_2 \leq 1 - D_1 \\ E = V_{ref} - V_o \end{cases} \quad (26)$$

式中： P^* 为给定功率； E 为输出电压实际值与期望值之差；线性约束 $D_1 \in [0, 1]$ 和 $D_2 \in [0, 1]$ 是两个独立移相变量的上界和下界。在改进的蛇群算法中，可以通过提前设定 D_1 和 D_2 的上下界。

但非线性约束中所涉及的功率和电压误差条件无法直接应用于改进的蛇群算法中，则需要引入惩罚函数来实现，从而目标函数可表示为：

$$F[D_1, D_2] = -2[k(D_1 - 1) - D_1 - 2D_2 + 1] + a_1 \times [4D_2 - 4D_2^2 - 2D_1^2 - P^*]^2 + a_2(V_{ref} - V_o) \quad (27)$$

式中： a_1 、 a_2 为惩罚系数，从整体结构来看，目标函数主要由 3 个部分组成，其中前两部分与电流应力相关，而第 3 部分用于反映电压偏差对系统运行状态的影响。在实际仿真过程中，对各部分指标的数值范围进行了观察。结果表明，与电压偏差项相比，电流应力相关指标的数值通常约为其一个数量级左右。考虑到本研究的主要目标是优化电流应力，因此在权重设计时适当提高了电流应力相关项的权重，以保证优化过程主要围绕电流应力指标展开，经过多次人工调试将 a_1 设为 5， a_2 设为 0.3。当变换器工作在模式 B 和模式 A 的情况类似，此处不再展开叙述。

2.3 算法流程

首先检测电路的输入电压、输出电压及参考电压，随后采用比例积分调节器 (PI) 对输出电压与参考电压的偏差进行补偿，以实现目标传输功率 P_0 。接着通过该优化算法计算得出最佳移相占空比 $[D_1, D_2]$ ，最终生成 PWM 控制信号驱动功率开关器件。图 6 为混合三电平变换器电流应力优化框图。

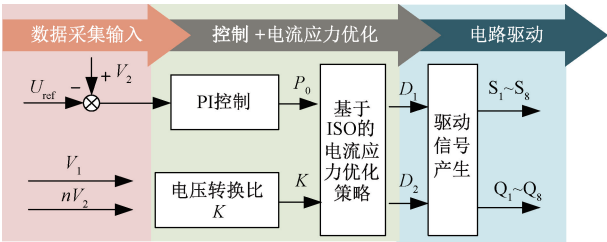


图 6 基于 ISO 优化算法的系统控制结构

Fig. 6 System control chart based on ISO optimization algorithm

改进的蛇群控制算法流程如图 7 所示。
为验证改进蛇群优化算法 (ISSO) 的收敛性能，选取两个典型测试函数 F1 和 F2 如图 8 所示，并与粒子群算

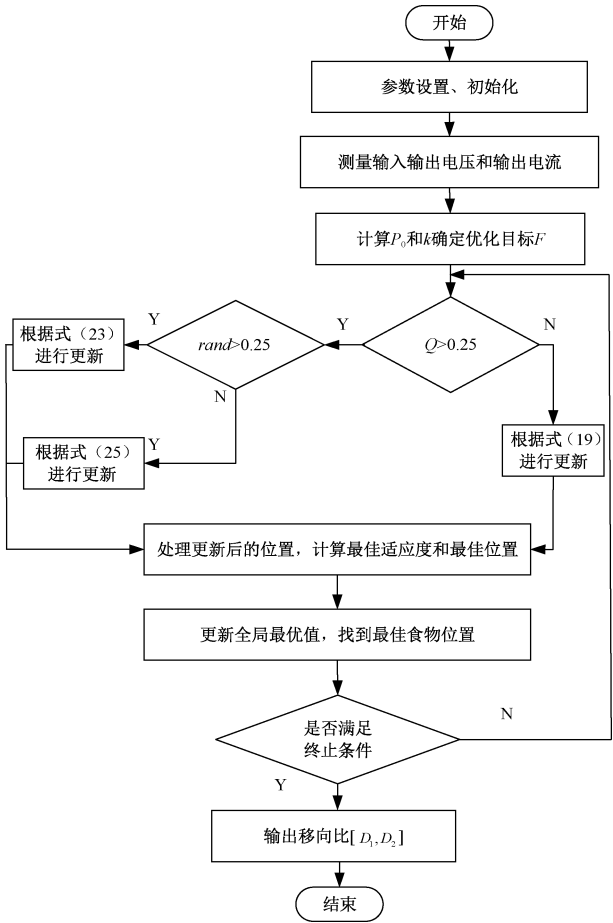


图 7 改进的蛇群算法控制流程

Fig. 7 Improved snake swarm algorithm control flow chart

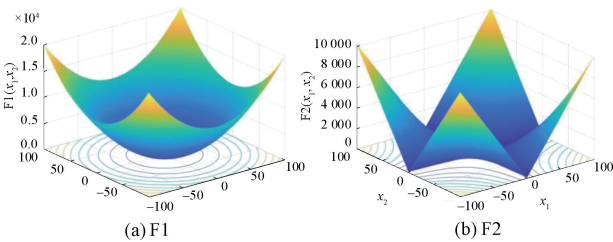


图 8 两种测试函数

Fig. 8 Two test functions

法 (PSO)、灰狼优化算法 (GWO) 以及原始蛇群算法 (SO) 进行对比实验，收敛曲线如图 9 所示。

从图 9 可以看出，在两个测试函数上，PSO 在初期下降较快，但后期容易陷入局部最优；GWO 整体收敛速度较慢，最终精度较低；原始 SO 算法相比前两者具有一定优势，但在迭代后期收敛速度有所下降。相比之下，改进蛇群优化算法在迭代过程中下降更快，并能够持续逼近更低的目标函数值。

综上，改进蛇群优化算法在两个测试函数上均表现

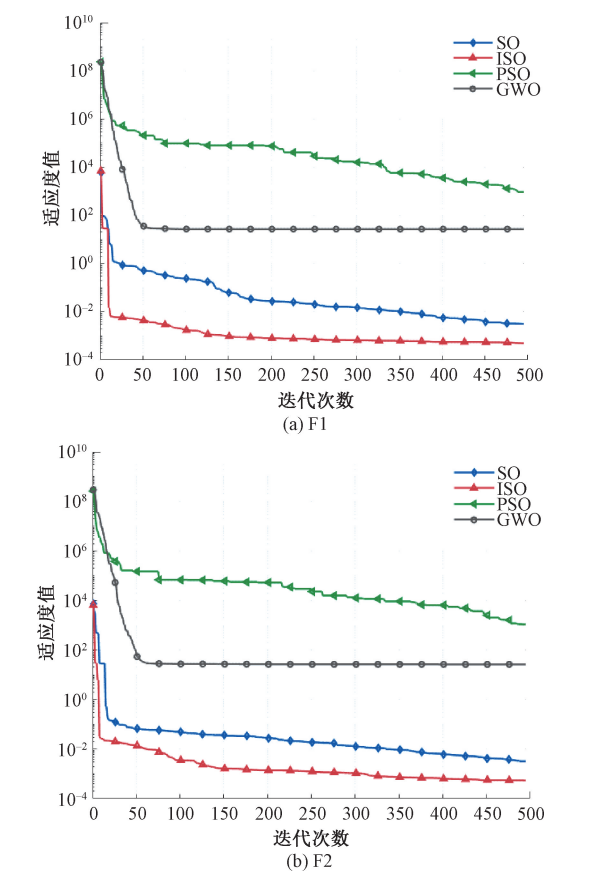


图 9 4 种算法收敛曲线对比

Fig. 9 Comparison of convergence curves of four algorithms

出更快的收敛速度和更高的收敛精度,整体收敛性能优于 PSO、GWO 以及原始 SO 算法。

为验证改进蛇群优化算法的的性能,对其进行时间复杂度分析。

对于传统蛇群优化算法,假设种群规模为 N ,决策变量维度为 d ,最大迭代次数为 M ,在每次迭代中需要对所有个体进行位置更新与适应度计算,因此其时间复杂度为 $O(N \times M \times d)$ 针对本文提出的改进蛇群优化算法。其时间复杂度分析如下。

- 1) 种群初始化阶段:算法首先在给定的移相角范围内随机生成初始种群,每个个体包含 d 维变量,因此初始化阶段需要生成 N 个个体,其时间复杂度 $O_1(N \times d)$;
- 2) 温度与食物量计算阶段:在每次迭代过程中,需要根据当前迭代次数计算温度参数 T 与食物量参数 Q ,并对种群进行适应度评估,该阶段需要遍历全部个体,因此时间复杂度为 $O_2(N \times M)$;
- 3) 蛇群觅食与交配位置更新阶段:在不同温度与食物条件下,计算新的适应度值,该阶段每次迭代均需对 N 个个体进行 d 维更新,因此其时间复杂度为 $O_3(N \times M \times d)$;

4) 引入北方苍鹰搜索机制阶段:引入北方苍鹰第一阶段的位置更新策略,对蛇群个体位置进行进一步调整。该过程同样需要对全部个体进行更新与适应度计算,因此时间复杂度为 $O_4(N \times M \times d)$;

5) 苍鹰攻击阶段局部搜索更新:在算法后期通过模拟苍鹰俯冲捕猎行为,对个体进行局部搜索更新。每次迭代均需对种群个体进行位置更新与比较操作,因此该阶段时间复杂度为 $O_5(N \times M \times d)$;

6) 算法总体时间复杂度:综上所述,改进蛇群优化算法的整体时间复杂度为 $O_1 + O_2 + O_3 + O_4 + O_5 = O(N \times d + N \times M \times d) = O(N \times M \times d)$ 。

综上所述,与传统蛇群优化算法相比,引入北方苍鹰搜索机制未改变算法时间复杂度阶数,仅在原有复杂度的基础上提升了算法的全局搜索能力与收敛性能。

3 仿真实验

为证明策略可行性,在 MATLAB/Simulink 中建模并进行验证。通过所提的控制方法与拉格朗日乘子法作对比。参数如表 1 所示。

表 1 NPCH3L-DAB 变换器相关参数

Table 1 Relevant parameters of the NPCH3L-DAB converter

指标	参数
输入电压/V	100
输出电压/V	15
辅助电感/ μ H	80
变压器电压比	4:1
输入侧滤波电容/ μ F	3 300
开关频率/kHz	50

拉格朗日乘子法依赖目标函数的性质,而 DAB 的电流应力模型高度非线性,导致电流应力求解结果不准。而蛇群算法,可以模拟蛇群觅食与交配行为,同时利用北方苍鹰算法改进搜索机制,并结合多因素条件限制,更快更精确的找到最优移相角组合,从而减小电流应力。

图 10 为引入三电平桥臂电流波形。规定当功率 $P \in [0, 0.4)$ 时为低功率, $P \in [0.4, 0.7)$ 时为中功率, $P \in [0.7, 1]$ 时为高功率。

如图 11 所示,当输入电压为 100 V、输出电压为 15 V, $P=0.28$ 时,拉格朗日乘子法的电流为 2.42 A,而改进蛇群算法的电流为 2.19 A。对比可知,低功率时所提方法在电流应力优化方面具有更显著的效果。

由图 12 可知, $P=0.55$ 时,采用拉格朗日乘子法的电流值为 3.11 A,而基于改进蛇群算法的电流值则为 2.76 A。对比可知,中功率模式时所提控制方法在电流应力优化

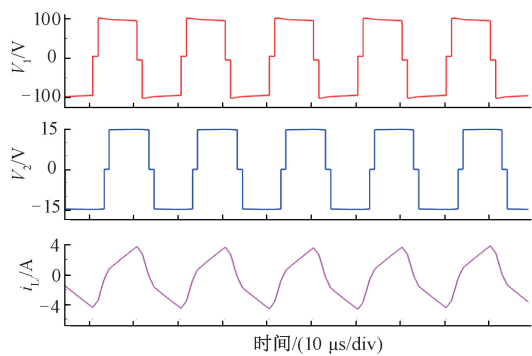
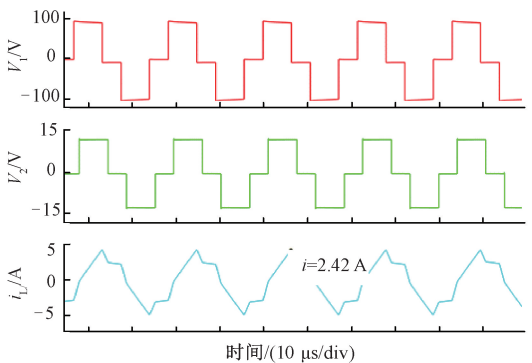


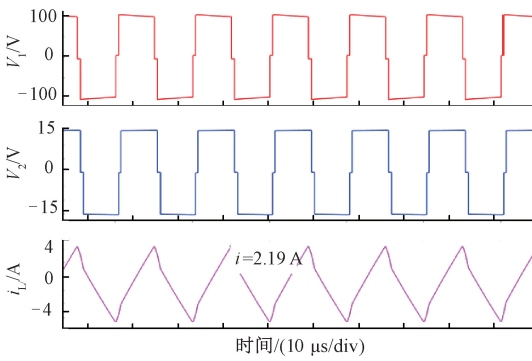
图 10 仿真波形

Fig. 10 Simulation waveform diagram



(a) 拉格朗日乘子法

(a) Lagrange multiplier method



(b) 改进蛇群

(b) Improvement of snake swarms

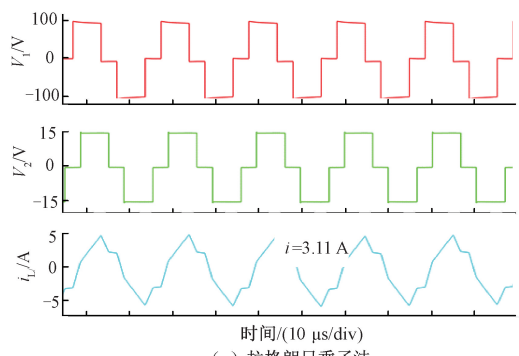
图 11 低功率模式时电路的仿真波形

Fig. 11 Simulation waveform of the circuit in low-power mode

方面具有更显著的效果。

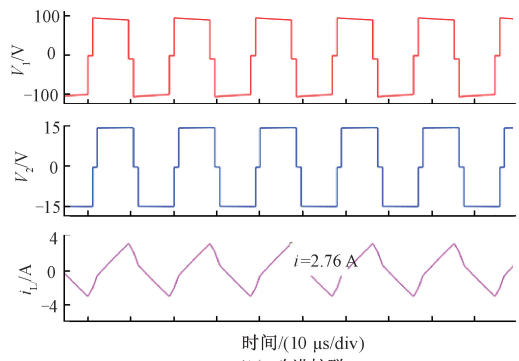
当 $P=0.76$ 时,从图 13 可以看出,实验结果表明,采用拉格朗日乘子法计算的电流值为 4.04 A ,而基于改进蛇群算法的电流值为 3.55 A 。对比可知,在高功率所提控制方法在电流应力优化方面具有更显著的效果。

图 14 所示为两种控制策略下变换器电流应力特性的对比结果。在固定电压比 k 的条件下,本研究提出的控制策略相比较于传统的拉格朗日乘数法,展现出显著



(a) 拉格朗日乘子法

(a) Lagrange multiplier method

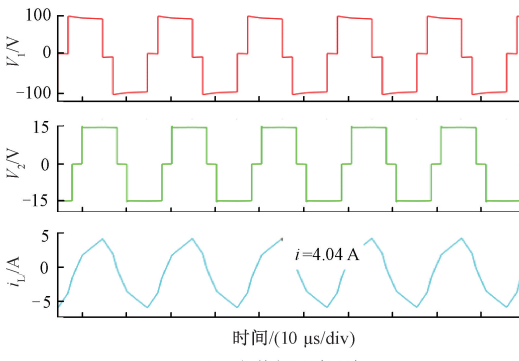


(b) 改进蛇群

(b) Improvement of snake swarms

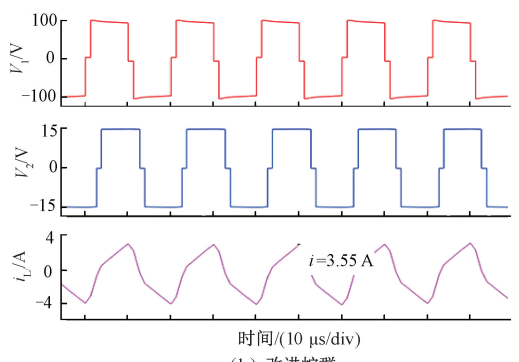
图 12 中功率模式时电路的仿真波形

Fig. 12 Simulation waveform of the circuit in medium-power mode



(a) 拉格朗日乘子法

(a) Lagrange multiplier method



(b) 改进蛇群

(b) Improvement of snake swarms

图 13 高功率模式时电路的仿真波形

Fig. 13 Simulation waveform of the circuit in high-power mode

的性能优势:该策略在全功率范围内均实现了更优的电流应力抑制效果,随着传输功率水平的提升,所提策略的优化效果呈现渐进增强的趋势。

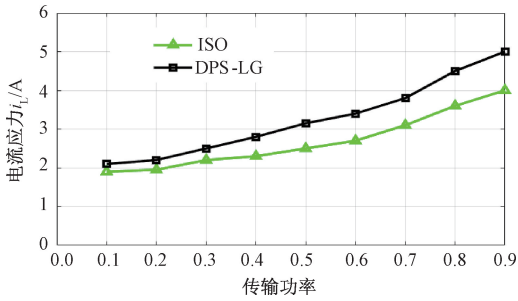


图 14 电流应力对比

Fig. 14 Comparison diagram of current stress

4 实验验证

为证明策略的可靠性,搭建试验平台验证,主要参数如表 1 所示。试验样机如图 15 所示。

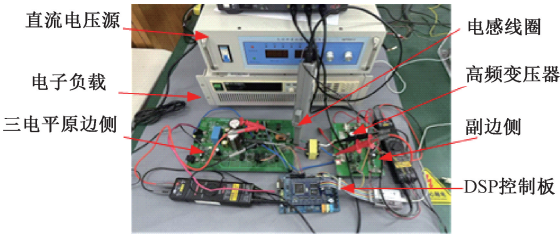


图 15 试验样机

Fig. 15 Test prototype

为了验证所提控制策略对电流应力的优化效果,将其与拉格朗日乘法进行试验对比,主要选取低功率段和高功率段进行试验验证。

当输入电压 V_1 为 100 V,输出电压 V_2 为 15 V,传输功率 $P=0.28$ 时,两种控制方式试验波形如图 16 所示。从图 16(a) 看出,采用拉格朗日乘法计算的电流值为 4.75 A;从图 16(b) 看出,基于改进蛇群算法的电流值为 3.61 A,验证了低功率时所提控制方法在电流应力优化方面效果更好。

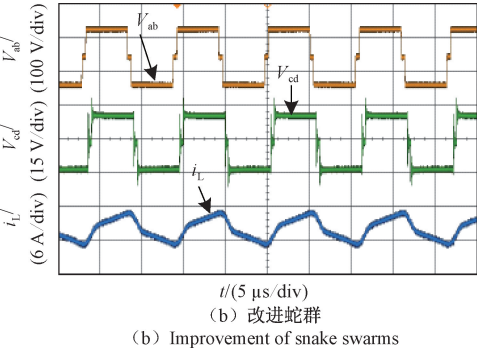
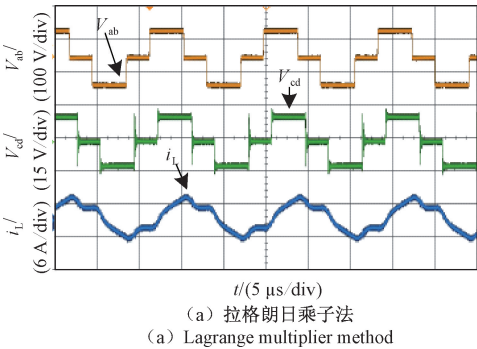


图 16 低功率的试验波形

Fig. 16 shows the test waveform diagram of low power

当工作在高功率段时, $P=0.76$,两种控制方式试验波形如图 17 所示。从图 17(a) 看出,采用拉格朗日乘法计算的电流值为 5.52 A;从图 17(b) 看出,基于改进蛇群算法的电流值为 4.81 A,对比可知,验证了高功率时所提控制方法在电流应力优化方面具有更显著的效果。

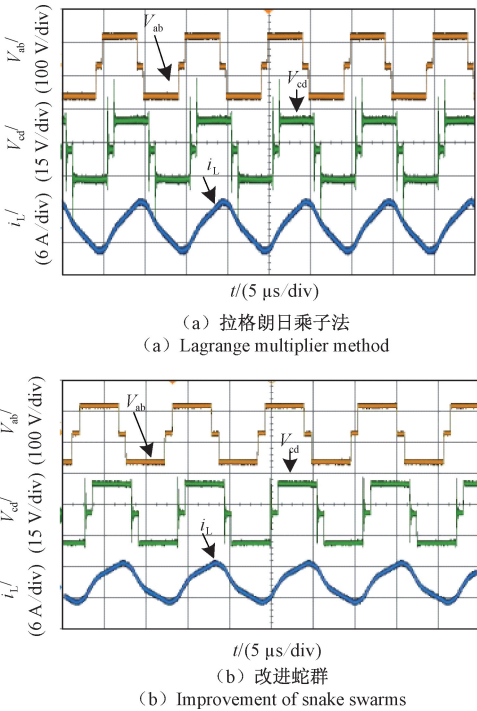


图 17 高功率的试验波形

Fig. 17 Test waveform diagram of high power

由图 18 可以得出所提出控制方法的效率显著高于拉格朗日乘法,优化效果更为明显。

为了更加全面地验证所提算法的性能,以高功率下电流应力为例进行对比与多种典型优化算法进行对比,包括 PSO、GWO 算法。通过仿真对比分析不同算法在相同工况下的电流应力优化效果,如表 2 所示。

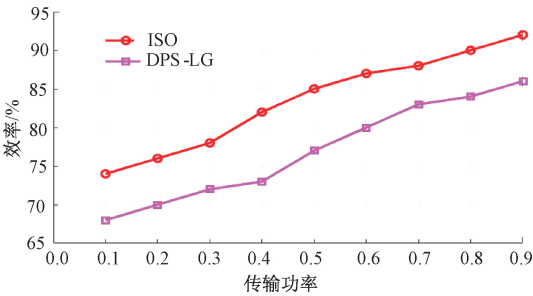


图 18 两种策略的效率曲线

Fig. 18 Efficiency curves of the two strategies

表 2 主流算法的电流应力优化效果

Table 2 Current stress optimization effect of mainstream algorithms

对比算法	电流应力/A
ISO	4.81
SO	4.95
PSO	5.35
GWO	5.12

结果表明本文提出的改进蛇群算法在电流应力优化效果方面与其他主流算法相比具有一定优势。

5 结 论

针对二极管钳位型混合三电平双有源桥变换器,对电流应力和传输功率的工作特性进行分析,提出了一种蛇群智能算法的电流应力优化策略,该策略突破了传统拉格朗日乘子法在局部工作点的局限性,并针对蛇群优化算法中存在的易陷入局部最优以及搜索速度低的问题,来引进北方苍鹰算法中的优势搜索机制,从而提高蛇群算法跳出局部最优的能力,加快了搜索精度。通过仿真与实验的对比验证,研究得出以下重要结论:所提出的改进蛇群优化算法在低功率时,较传统方法能够有效降低电流应力水平;当系统运行于高功率时,其优化效果更为突出。通过全工况范围的优化设计,实现了系统整体损耗的显著降低;实验数据显示,在额定输入电压下,随着传输功率的增加,该优化算法的电流应力优化效果更加明显,验证了所提改进方法的有效性。

参考文献

[1] QIN L, WU T X, GUAN Y, et al. Decoupling control strategy for input-series-output-parallel dual active bridge converter based on linear active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2025, 61(4): 6484-6498.

[2] 刘春喜,田迎澳,王涛. 混合三电平双有源桥变换器超

螺旋滑模自抗扰控制策略[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(10): 209-219.

LIU CH X, TIAN Y AO, WANG T. Super-twisting sliding mode active disturbance rejection control strategy for hybrid three-level dual active bridge converters [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(10): 209-219.

[3] 赵莹莹,何怡刚,杜博伦,等. 基于 LSSA 优化 DBN 的双有源桥变换器开路故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(4): 56-64.

ZHAO Y Y, HE Y G, DU B L, et al. Open-circuit fault diagnosis of dual active bridge converter based on LSSA optimized DBN [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(4): 56-64.

[4] 卢自宝,龚莉,赵传超,等. 直流微电网中 DC-DC 变换器的切换控制方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 41(8): 202-209.

LU Z B, GONG L, ZHAO CH CH, et al. Research on switching control method of DC-DC converter in DC microgrid[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 41(8): 202-209.

[5] ESTEBAN F D, SERRA F M, DE ANGELO C H. Control of a DC-DC dual active bridge converter in DC microgrids applications [J]. IEEE Latin America Transactions, 2021, 19(8): 1261-1269.

[6] WANG Y, WEN H, ZHU Y, et al. Minimum-current-stress scheme of three-level dual-active-bridge dc-dc converters with the particle swarm optimization[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2021, 7(4): 2067-2084.

[7] 刘春喜,咎晨宇,王涛,等. 双有源桥变换器改进双重移相控制策略优化[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(12): 397-410.

LIU CH X, ZAN CH Y, WANG T, et al. Optimization of improved dual-phase-shift control strategy for dual active bridge converters[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(12): 397-410.

[8] 金莉,刘邦银,段善旭. 三电平双有源全桥 DC-DC 变换器回流功率最小的移相控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(24): 5864-5873.

JIN L, LIU B Y, DUAN SH X. Phase shift control of three-level dual active full-bridge DC-DC converter with minimum return power [J]. Journal of Electrical Technology, 2018, 33(24): 5864-5873.

[9] PANG J, WANG K, WU M, et al. Modulation and soft-

- switching optimization control of multilevel dual active bridge DC-DC converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 40(1): 1936-1951.
- [10] YANG G, WANG A, ZHANG D. Transient DC bias suppression for three-level dual-active-bridge converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 40(9): 12084-12094.
- [11] WU F, WANG K, LUO S. Hybrid-three-level current-fed series-resonant isolated DC-DC converter and its optimization modulation strategy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 37(1): 196-205.
- [12] WANG J, TAN L, LI J, et al. Research on model predictive control strategy of three-level dual-active bridge DC-DC converter [J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 10622.
- [13] 刘述喜,陈鹤铭,王子豪,等. 基于双重移相控制的 DC-DC 变换器电流应力优化策略[J]. 电子器件, 2024, 47(5): 1281-1287.
- LIU SH X, CHEN H M, WANG Z H, et al. Current stress optimization strategy of DC-DC converter based on dual phase shift control [J]. Electronic Devices, 2024, 47(5): 1281-1287.
- [14] 王祺,张泽轲,刘彬,等. 双重移相控制下双有源桥变换器最小回流功率全局优化控制[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3921-3930.
- WANG Q, ZHANG Z K, LIU B, et al. Global optimization control of minimum backflow power of dual active bridge converter under dual phase shift control [J]. Grid Technology, 2024, 48(9): 3921-3930.
- [15] 戴前程,张春,罗苏明,等. 基于改进扩展移相的双向 DC-DC 变换器控制策略[J]. 四川轻化工大学学报(自然科学版), 2024, 37(3): 51-58.
- DAI Q CH, ZHANG CH, LUO S M, et al. Bidirectional DC-DC converter control strategy based on improved extended phase shift[J]. Journal of Sichuan University of Light Chemical Technology (Natural Science Edition), 2024, 37(3): 51-58.
- [16] YANG P, WANG M, LIU S, et al. Unilateral asymmetric triple phase shift modulation strategy for DAB converter compromising RMS current and soft-switching range[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2024, 71(6): 3216-3220.
- [17] 余伟臣,高明,干方宇,等. 基于组合双重移相的双有源桥 DC-DC 变换器电流应力优化控制[J]. 电源学报, 2025, 23(2): 21-30.
- YU W CH, GAO M, GAN F Y, et al. Current stress optimal control of hybrid dual active bridge DC-DC converter based on combined dual phase shift [J]. Power Journal, 2025, 23(2): 21-30.
- [18] 王盼,朱继喆,叶高翔,等. 基于超螺旋滑模控制的双有源桥 DC-DC 变换器电流应力优化控制[J]. 高电压技术, 2025, 51(3): 1295-1306.
- WANG P, ZHU J Z, YE G X, et al. Current stress optimization control of dual active bridge DC-DC converter based on super-twisting sliding mode control [J]. High Voltage Technology, 2025, 51(3): 1295-1306.
- [19] 蔡逢煌,石安邦,江加辉,等. 结合电流应力优化与虚拟电压补偿的双有源桥 DC-DC 变换器三重移相优化控制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(10): 2559-2571.
- CAI F H, SHI AN B, JIANG J H, et al. Triple phase shift optimization control of dual active bridge DC-DC converter combined with current stress optimization and virtual voltage compensation [J]. Journal of Electrical Technology, 2022, 37(10): 2559-2571.
- [20] 陶海军,王宏伟,杨乃通. 基于新扩展移相双有源全桥变换器降压-升压模式下电流应力优化[J]. 上海交通大学学报, 2024, 58(10): 1585-1595.
- TAO H J, WANG H Y, YANG N T. Current stress optimization based on the new extended phase-shifted dual active full-bridge converter in buck-boost mode [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2024, 58(10): 1585-1595.
- [21] 王要强,钟正阳,李想,等. 基于线性化的单级式双有源桥 AC-DC 变换器最小电流应力控制策略[J]. 电工技术学报, 2025, 40(10): 3224-3235.
- WANG Y Q, ZHONG ZH Y, LI X, et al. Linearized minimum current stress control strategy for single-stage dual active bridge AC-DC converter [J]. Journal of Electrical Technology, 2025, 40(10): 3224-3235.
- [22] 孙标广,邓旭哲. 三重移相下的双有源桥变换器结合 ZVS 的最小电流应力控制[J]. 电工电能新技术, 2025, 44(1): 45-56.
- SUN B G, DENG X ZH. Dual active bridge converter combined with ZVS minimum current stress control under triple phase shift [J]. New Technology of Electrical Energy, 2025, 44(1): 45-56.
- [23] HASHIM F A, HUSSIEN A G. Snake optimizer: A novel meta-heuristic optimization algorithm [J]. Knowledge-Based Systems, 2022, 242: 108320.
- [24] DEGHANI M, HUBÁLOVSKÝ Š, TROJOVSKÝ P.

Northern goshawk optimization; A new swarm-based algorithm for solving optimization problems [J]. IEEE Access, 2021, 9: 162059-162080.

作者简介



刘春喜(通信作者),2001 年和 2004 年于辽宁工程技术大学分别获得学士学位和硕士学位,2010 年于浙江大学获得博士学位,现为辽宁工程技术大学副教授、硕士生导师,研究方向为双向变流器拓扑结构及其控制技术。

E-mail: lntulcx@163.com

Liu Chunxi (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2001 and 2004, and his Ph. D. degree from Zhejiang

University in 2010. He is now an associate professor and M. Sc. supervisor of Liaoning Technical University. His main research interests include bidirectional converter topology and control technology.



徐辰,2023 年于安徽信息工程大学获得学士学位,现为辽宁工程技术大学硕士研究生,主要研究方向为电力电子变换器拓扑与控制技术。

E-mail: 734637085@qq.com

Xu Chen received his B. Sc. degree from Anhui University of Information Engineering in 2023. He is now a M. Sc. candidate at Liaoning Technical University. His main research interests include power electronic converter topology and control technology.