

Global Efficiency Optimal Modulation Method of Double Active Bridge DC-DC Converter

HAN Huishan^{*}, BI Yanjun, LIANG Shu

(Department of Electrical Engineering, Xingtai Polytechnic College, Xingtai Hebei 054000, China)

Abstract: The triple phase shift (TPS) modulation method of double active bridge (DAB) converter needs to get the modulation parameters of the system in advance, so it is difficult to establish and solve the accurate global efficiency optimal objective function. An optimization method based on particle swarm optimization (PSO) algorithm is proposed to achieve the global efficiency optimization of DAB converter to solve the above problems, so that the converter can operate efficiently in the full load range, maintain low reactive power and peak current value. Simulation and experimental results verify the correctness and feasibility of the proposed method.

Key words: double active bridge converter; particle swarm optimization algorithm; triple phase shift
EEACC: 1290B **doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2021.01.013**

用于双有源桥 DC-DC 变换器的全局效率最优调制方法

韩会山^{*}, 毕艳军, 梁舒

(邢台职业技术学院电气工程系, 河北 邢台 054000)

摘要: 双有源桥 (DAB) 变换器三重移相 (TPS) 调制方法需要预先求取系统的调制参数, 难以建立并求解精确的全局效率最优目标函数。本文提出了一种基于粒子群优化 (PSO) 算法实现 DAB 变换器全局效率最优的寻优方法以解决上述问题, 使变换器能以高效率在整个工作范围内运行, 并保持较低的无功环流和电流峰值。仿真与实验结果都验证了所提方法的正确性与可行性。

关键词: 双有源桥变换器; 粒子群优化算法; 三重移相
中图分类号: TN624 **文献标识码: A** **文章编号: 1005-9490(2021)01-0067-05**

随着社会进步, 新能源的发展逐步成为各个国家的首要战略目标。双有源全桥 (Double Active Bridge, DAB) 双向 DC-DC 变换器以其控制方式灵活、动态响应快、结构对称等特点, 以及易于串并联, 适应高低压变化, 具备能量双向传输等优点, 得到了广泛的关注^[1-2]。同时, DAB 变换器在电动汽车与电网互动 (V2G)、储能系统和电源供电系统等方面具有重要的应用前景^[3-4]。

自从 DAB 变换器被提出以来, 相关研究主要集中在其调制策略、功率传输特性、软开关实现以及控制方法等方面。在调制策略方面, 通常包含有单移相调制 (SPS)、双重移相调制 (DPS) 和三重移相调制 (TPS) 等。SPS 调制方式是最常用的调制方法之一, 其控制方法简单, 但无法调节和控制变换器回流功率

与电感电流有效值^[5]。一些学者认为 DAB 变换器存在功率回流现象造成了传输效率的下降, 从减少回流功率方面研究了 DPS 等调制方式。其中, 文章 [6] 所提方法降低了 DAB 变换器运行时的无功回流功率。但对于 DPS 调制方式来说, 电路系统的无功环流仍旧很高, 这限制了变换器系统进一步提高传输效率。TPS 调制方式涵盖了 SPS 与 DPS 调制方式, 理论上可以实现更优的控制效果^[7]。文章 [8] 提出一种 TPS 调制策略, 提高了 DAB 变换器的传输效率, 计算出了最优控制量使 DAB 变换器拥有最小化的电流应力和导通损耗。该方法虽然减小了电感电流, 但并没有直接以效率最优为控制目标, 因此其传输效率未在最优状态。此种方式下, 建立精确而复杂的最优效率目标函数将导致全局最优调制参数难以被确定。

本文提出了一种基于粒子群优化(PSO)算法的DAB变换器全局效率最优调制方法。其根据变换器系统的电路参数与实时的工作状态建立了精确的最优效率目标函数。设计三重移相占空比控制器,可以根据给定的传输功率,利用PSO算法搜索系统最优调制参数,从而得到最优三重移相占空比,使得DAB变换器在全负载范围内始终工作在传输效率最优的状态。

1 电路拓扑与数学模型

图1为DAB变换器的电路拓扑结构,其由开关管 $Q_1 \sim Q_8$ 构成的两个电压源型有源全桥、高频变压器 T_1 、谐振电感 L_r 、以及两个直流母线支撑电容 C_1 、 C_2 组成。在该拓扑中, L_m 为高频变压器的励磁电感。在移相调制策略中,各个桥臂的上下开关管均为互补驱动信号。一、二桥臂的桥口输出电压为 v_p ;三、四桥臂的桥口输出电压为 v_s ;一次侧直流母线电压值为 V_1 ;二次侧直流母线电压值为 V_2 ;电感 L_r 两端电压为 v_L ;电流为 i_L 。定义变换器的开关周期为 $2T$ 。

在TPS调制方式下,DAB变换器各个开关管的驱动信号波形和桥口电压波形 v_p 、 v_s 如图2所示。

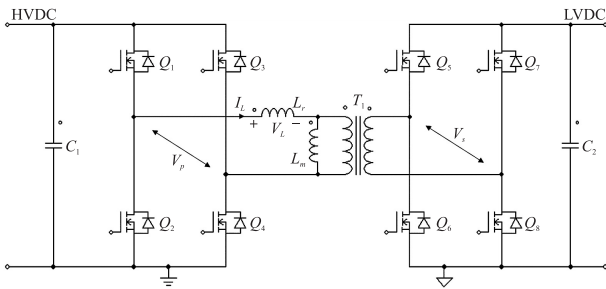


图1 DAB变换器电路拓扑

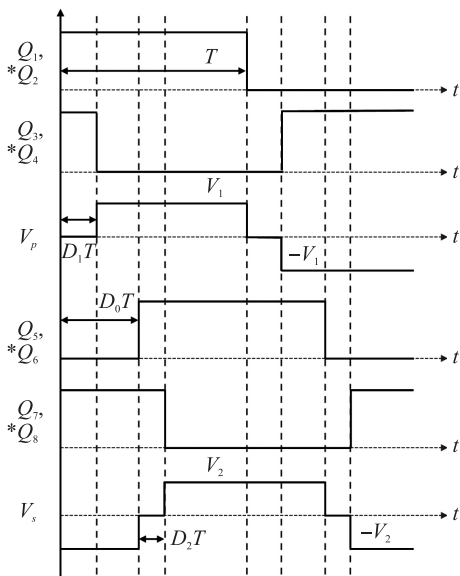


图2 DAB驱动波形与桥口电压波形

TPS调制方式下,所有开关管都为50%占空比。其中开关管 Q_1 、 Q_2 的驱动信号分别超前开关管 Q_5 、 Q_6 为 $D_0 \times 180^\circ$;开关管 Q_1 、 Q_2 的驱动信号分别超前开关管 Q_4 、 Q_3 为 $D_1 \times 180^\circ$;开关管 Q_5 、 Q_6 的驱动信号分别超前开关管 Q_8 、 Q_7 为 $D_2 \times 180^\circ$ 。其中,移相占空比 D_0 取值范围为 $-1 \sim 1$, D_1 取值范围为 $0 \sim 1$, D_2 取值范围为 $0 \sim 1$ 。可以看出,TPS调制方式拥有三个控制自由度,可以通过适当选取三个控制变量,使DAB变换器工作在效率最优状态。

如式(1)定义方波函数 $S(t)$,占空比为0.5、周期为 $2T$ 。

$$S(t) = \begin{cases} 0.5(t-2kT) - 0.25T & 2kT \leq t < (2k+1)T \\ -0.5(t-2kT) + 0.75T & (2k+1)T \leq t < (2k+2)T \end{cases} \quad [k \in 0, 1, 2, \dots] \quad (1)$$

根据图2可知,桥口电压波形 $v_p(t)$ 、 $v_s(t)$ 为如式(2)、式(3)所示的三电平方波。

$$v_p(t) = V_1 \times [S(t) + S(t-D_1T)] \quad (2)$$

$$v_s(t) = V_2 \times [S(t-D_0T) + S(t-D_2T-D_0T)] \quad (3)$$

根据电路拓扑结构与 $v_p(t)$ 、 $v_s(t)$ 公式,可以简化DAB变换器的数学模型如图3所示。其中,原副边全桥分别被简化为两个串联的电压源,高频变压器在理想情况下被省略, n 为变压器的变比。

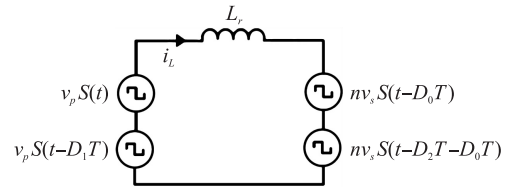


图3 DAB变换器等效模型

根据图3及电感伏秒平衡公式,可以推导出变换器稳态工作时电感电流的有效值平方表达式与变换器的传输功率表达式,分别如式(4)、式(5)所示。

$$I_{\text{rms}}^2 = \frac{1}{TL^2} \int_0^T [V_1 \cdot Tr(t) + V_1 \cdot Tr(t-D_1T) - n \cdot V_2 \cdot Tr(t-D_0T) - n \cdot V_2 \cdot Tr(t-D_2T-D_0T)]^2 dt \quad (4)$$

$$P_t = \frac{nV_1V_2}{TL} \left[\int_{D_1T}^T Tr(t-D_2T-D_0T) dt - \int_{D_1T}^T Tr(t-D_0T) dt \right] \quad (5)$$

式中: $Tr(t) = \int S(t) dt$ 。

对于不同的 D_0 、 D_1 、 D_2 ,式(4)、式(5)的形式不同,因此传统方法无法对不同工作点进行统一的分析。设置直流电压 V_1 为500V, V_2 为240V,开关频率为20kHz,变压器变比为1:1, L_r 为47 μH 。根据

式(4)、式(5)与 TPS 占空比的取值范围, 可以建立三维传输功率分布图与电感电流有效值平方分布图, 分别如图 4、图 5 所示。

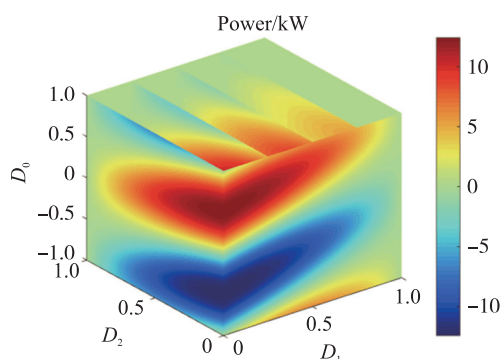


图 4 DAB 变换器传输功率分布图

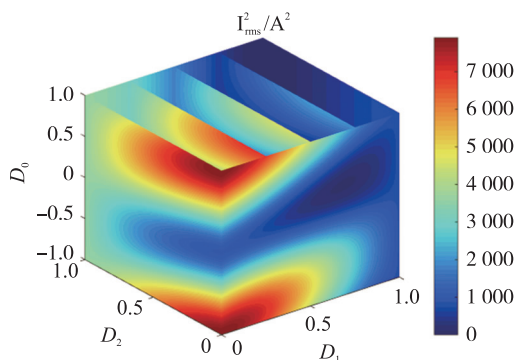


图 5 DAB 变换器电感电流均方值分布图

图 4 与图 5 中, 三维坐标系中任意一点的坐标分别对应三重移相占空比 D_0 、 D_1 、 D_2 。该点的颜色深浅表示相应取值的大小。对应于某一给定的传输功率, 输入变量有多种不同的组合形式。对于这些不同组合形式, 得到的电感电流有效值不同。在 DAB 变换器中, 由于电路存在阻抗, 电感电流造成了变换器的功率损失。通过相关算法对输入变量 D_1 、 D_2 、 D_3 进行合理规划, 将会得到一种最优组合, 使变换器传输功率一定时, 对应的功率损失最小, 这样变换器就能工作在效率最优的状态下。

2 改进粒子群优化算法

PSO 算法属于 AI 智能算法, 具有实现较为简单、控制参数少且不依赖目标函数的特点。目前, 部分学者在电力电子技术相关的问题中尝试应用 PSO 理论, 并取得了研究成果^[9]。

三维空间中粒子群算法模型如式(6)、式(7)所示。

$$\mathbf{v}_i(j+1) = w \cdot \mathbf{v}_i(j) + c_1 \mathbf{r}_1(j) \cdot [\mathbf{p}_i(j) - \mathbf{x}_i(j)] + c_2 \mathbf{r}_2(j) \cdot [\mathbf{p}_g(j) - \mathbf{x}_i(j)] \quad (6)$$

$$\mathbf{x}_i(j+1) = \mathbf{x}_i(j) + \mathbf{v}_i(j) \quad (7)$$

向量 $\mathbf{x}_i(j)$ 表示粒子在三维向量空间中的位置, 下标“ i ”表示第 i 个粒子, “ j ”表示粒子的第 j 代; $\mathbf{v}_i(j)$ 为粒子的速度向量, 表示粒子运动快慢; 向量 $\mathbf{p}_g(j)$ 、 $\mathbf{p}_i(j)$ 分别为粒子群群体的最优位置与个体的最优位置; c_k 为粒子的加速度常数; w 为惯性权重系数; $\mathbf{r}_k(j)$ 为三维均匀分布随机函数, 其每个维度的取值范围为 $0 \sim 1$; N 为粒子总数; J 为最大迭代次数。

PSO 算法通常更适用于求解非约束优化问题, 在求解非线性约束问题时, 需要如式(8)构造带有惩罚因子的广义目标函数改进粒子群算法。其中, 每一个粒子的适应度函数为 $F(\mathbf{x}_i(j)) = F(D_0, D_1, D_2)$, 以最小值为目标。

$$F(\mathbf{x}_i(j)) = \begin{cases} f(\mathbf{x}_i(j)) & \mathbf{x} \in \Omega \\ f(\mathbf{x}_i(j)) + h \cdot H(\mathbf{x}_i(j)) & \mathbf{x} \notin \Omega \end{cases} \quad (8)$$

式中: $f(\mathbf{x}_i(j))$ 为原目标函数, 如式(9)所示; h 为惩罚力度(通常取 $500 \sim 1000$); $H(\mathbf{x}_i(j))$ 为惩罚因子, 如式(10)所示; Ω 为 $\mathbf{x}_i(j)$ 的可行域, 由 D_0 、 D_1 、 D_2 的取值范围确定。

式(9)中目标函数 $f(\mathbf{x}_i(j))$ 设计为系统总损耗, 当系统损耗最低时, 认为传输效率最高。其中系统损耗包括了线路内阻损耗与开关损耗。当使用 IGBT 开关管时, 还应包含 IGBT 压降产生的导通损耗。

$$f(\mathbf{x}_i(j)) = r_{\text{DAB}} I_{\text{rms}}^2 + V_{\text{IGBT}} \sqrt{I_{\text{rms}}^2} + \frac{8(E_{\text{on}} + E_{\text{off}})}{2T} \quad (9)$$

式中: r_{DAB} 为回路总内阻, V_{IGBT} 为回路中 IGBT 的总压降, $(E_{\text{on}} + E_{\text{off}})$ 为单个开关管的开关损耗能量, 通常可以从器件的数据手册中得出。

式(10)的惩罚函数保证了输出功率等于给定传输功率。

$$H(\mathbf{x}_i(j)) = P_i - P_{\text{set}} \quad (10)$$

根据粒子群算法模型, DAB 变换器全局效率最优控制方法如下, 共分为 9 个阶段。

阶段 1, 初始化粒子群: 初始时刻, 根据经验设置加速度常数 c_1 、 c_2 (通常为 $0 \sim 2$)、惯性权重 w (通常为 $0.5 \sim 1$)、粒子数量 N (通常为 $200 \sim 500$)、最大迭代次数 J (通常为 $500 \sim 2000$)。随机设置粒子群内各个粒子的起始位置 $\mathbf{x}_i(0)$, 并根据式(8)对每一个粒子的适应度进行求解。依此设置粒子群群体最优位置 $\mathbf{p}_g(0)$ 与个体最优位置 $\mathbf{p}_i(0)$ 。初始化粒子的初速度 $\mathbf{v}_i(0)$ (粒子每个维度的初始速度通常为 $0 \sim 0.2$)。执行阶段 2。

阶段 2, 变量更新: 更新电压值 V_1 、 V_2 ; 传输功率给定 P_{set} ; 电感值 L_r 。执行阶段 3。

阶段 3, 粒子位置计算: 根据式(7)计算并更新

粒子群内每一个粒子的最新位置。若计算位置超出可行域,则通过降低当前速度 $v_i(j)$,将粒子限制在系统所划定的可行域边界之内。执行阶段 4。

阶段 4,加入微小扰动:若发现某粒子的速度为零,则如式(11)所示,加入微小扰动(z 通常小于 0.05)。此方法避免了粒子群内的粒子静止不动,有利于提高 PSO 的动态性能。执行阶段 5。

$$v_i(j+1) = v_i(j+1) + z \cdot r(j) \quad (11)$$

阶段 5,粒子速度计算:根据式(6)计算并更新粒子群内每一个粒子的速度。执行阶段 6。

阶段 6,粒子适应度计算:根据式(8)~式(10),计算并记录粒子群各个粒子的适应度函数 $F(v_i(j+1))$,用于之后的位置更新。执行阶段 7。

阶段 7,个体最优位置更新:根据阶段 6 中的记录结果与历史个体最优位置的适应度函数比较。若某粒子当前位置的适应度较优,则更改该粒子的个体最优位置 $p_i(j+1)$ 为当前所处位置。执行阶段 8;

阶段 8,群体最优位置更新:根据阶段 6 中的记录结果找到本轮迭代内的群体最优位置,并与群体最优位置比较适应度,将较优位置设置为群体最优位置 $p_g(j+1)$ 。执行阶段 9;

阶段 9,终止条件判断:将群体最优位置的坐标作为 TPS 占空比 D_0 、 D_1 、 D_2 输出给开关管驱动单元。判断当前迭代次数,若达到最大迭代次数,则此次粒子群优化结束,否则跳回阶段 2 继续执行 PSO 算法。

利用上述方法可以处理复杂的全局效率最优目标函数,同时可以实时寻优三重移相占空比,使 DAB 变换器在全负载范围内以最优传输效率运行。保持了较低的回流功率、电感电流峰值和有效值。

3 仿真与实验验证

为了验证本文所提方法的有效性,首先在 MATLAB 环境下对其进行了仿真验证,其次搭建平台进行了实验验证。设置直流电压 V_1 为 500 V, V_2 为 240 V,开关频率为 20 kHz,变压器变比为 1:1, L_r 为 47 μ H。

图 6 为 DAB 变换器在不同给定功率时的 MATLAB 闭环仿真波形。仿真波形分别为 $V_p(t)$ 、 $V_s(t)$ 电压波形与电感电流波形,分别标记为 V_{B1} 、 V_{B2} 与 I_L 。

图 6 分别显示了不同传输功率时的工作波形,变换器正常工作。进一步,随着给定功率增加,PSO 优化后的 TPS 占空比的变化轨迹如图 7 所示。

可以看出,变换器的最优调制方式从 TPS 调制

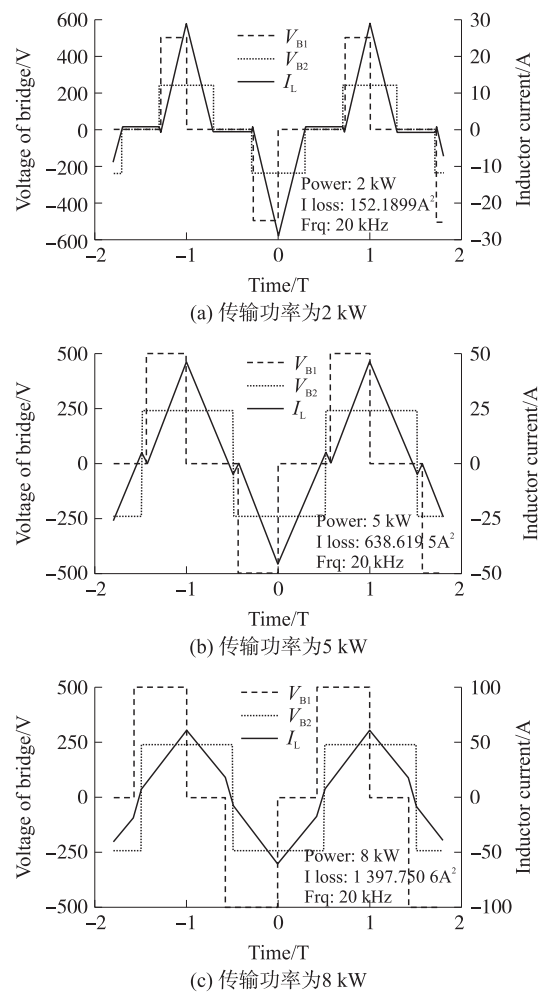


图 6 不同给定功率下的闭环仿真波形

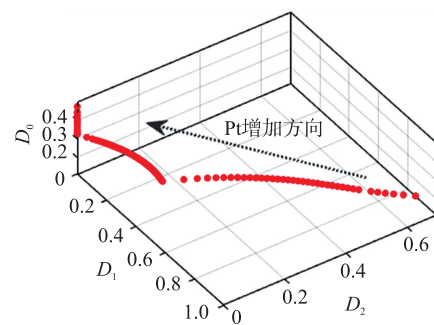


图 7 PSO 优化后的 TPS 占空比轨迹

方式, DPS 调制方式到 SPS 调制方式逐渐变化。在全工作范围内,本文所提方法均能对三重移相占空比进行寻优,并能实时得到最优控制量,使 DAB 变换器在全负载范围内以最优传输效率运行。

如图 8 所示为传输功率为 8 kW 时的实际电路工作波形,图中分别表示了 V_p 电压波形、 V_s 电压波形与电感电流波形 i_L 。此时原边电压峰值为 500 V,副边电压峰值为 250 V,电感电流有效值约为 36 A,实验结果与仿真结果一致,证明了本文所提调制策略下 DAB 变换器可以正常稳定的工作。

图 9 所示波形分别为同一 DAB 变换器下的 SPS

方式效率曲线、DPS 方式效率曲线、TPS 方式效率曲线与经过本文 PSO 算法优化后的 TPS 效率曲线。

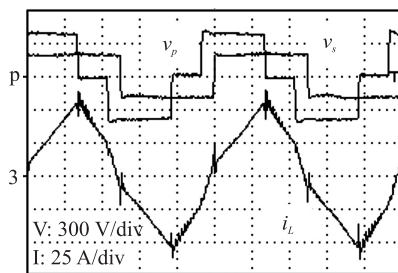


图 8 实际电路工作波形 (8 kW)

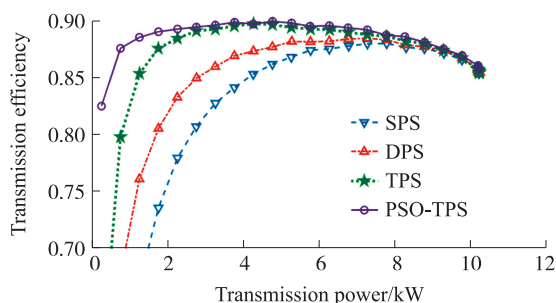


图 9 DAB 变换器效率对比曲线

由图 9 得出,全工作范围内,本文算法下的 TPS 方式传输效率优于传统的 SPS、DPS 方式与经典 TPS 方式。相比于经典 TPS 方式,本文所提方法显著提高了变换器在轻载时的效率。实验结果验证了粒子群算法应用在实现 DAB 变换器全局效率最优的三重移相占空比寻优方法上的正确性与可行性,也说明了所提方法的实际应用价值。

4 结论

针对 TPS 调制方式下,难以建立精确而复杂的最优效率目标函数的问题,提出了一种基于粒子群优化(PSO)算法的 DAB 变换器全局效率最优调制方

法。该方法根据变换器参数、工作状态和给定传输功率实时搜索系统最优调制参数,得到最优三重移相占空比,使得 DAB 变换器在全负载范围内始终工作在传输效率最优的状态,且保持较低的回流功率、电感电流峰值和有效值。本文通过 MATLAB 仿真与实验验证了该算法的性能,证明了所提方法的正确性与实际的可行性。

参考文献:

- [1] 孙凯,陈欢,吴红飞. 面向储能系统应用的隔离型双向 DC-DC 变换器分析方法与控制技术综述[J]. 电工电能新技术, 2019(8):1-9.
- [2] 曾进辉,孙志峰,雷敏,等. 独立输入并联输出双有源全桥 DC-DC 变换器无电流传感器均流控制[J]. 中国电机工程学报, 2019,39(7):2144-2155.
- [3] 侯聂,宋文胜. 全桥隔离 DC/DC 变换器的三重相移控制及其软启动方法[J]. 中国电机工程学报, 2015(23):6115-6121.
- [4] Sun X, Wang Z, Zhang Q, et al. Variable Frequency Triple-Phase-Shift Modulation Strategy for Minimizing RMS Current in Dual-Active-Bridge DC-DC Converters [J]. Power Electron, 2021. <https://doi.org/10.1007/s43236-020-00183-8>.
- [5] Everts, Jordi, Krismer, et al. Optimal ZVS Modulation of Single-Phase Single-Stage Bidirectional DAB AC-DC Converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 29(8):3954-3970.
- [6] 周一雄,秦文萍,王祺,等. 双移相变频控制的隔离型双向 AC/DC 变换器控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(5):1826-1833.
- [7] Everts, Jordi. Closed-Form Solution for Efficient ZVS Modulation of DAB Converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 32(10):7561-7576.
- [8] 黄珺,王跃,李卓强,等. 基于三重移相控制的双主动全桥直流变换器优化调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6):1658-1666.
- [9] 张爱斌,潘志翔,曾曾沧,等. 基于 PSO 的 LCC 谐振变换器的参数优化设计[J]. 电力电子技术, 2016, 50(12):45-48.



韩会山(1975—),男,汉族,山西省原平市人,副教授,硕士研究生,主要研究方向为应用系统集成、PLC 自动化系统集成、以及运动控制与电气传动技术, hhshan88@163.com。