



研究与开发

基于改进遗传算法的双向DC-DC变换器控制策略研究

李黎, 陈灿, 李灿, 高菲璠, 陈拽霞, 刘洋, 周鸿喜
(国家电网有限公司信息通信分公司, 北京 100761)

摘要: 选取双向DC-DC变换器为研究对象, 根据混合储能系统中储能元件和耗能元件的连接拓扑结构确定在不同能量流动方向上的功率需求指标, 确定变换器主要元件的参数和合适的电路元件。搭建降压/升压(buck/boost)电路模型, 并设计自适应快速终端滑模控制策略, 提出改进遗传算法对控制器的参数进行优化。由于不同控制参数的控制效果不同, 为了获得更好的电压输出特性, 对自适应快速终端滑模控制策略进行参数优化, 并通过仿真验证了该方法具有良好的控制性能。

关键词: 遗传算法; BP神经网络; 自抗扰; Cuk变换器; DC-DC

中图分类号: TM4

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024145

Research on control strategy of bidirectional DC-DC converter based on improved genetic algorithm

LI Li, CHEN Can, LI Can, GAO Feifan, CHEN Zhuaixia, LIU Yang, ZHOU Hongxi
State Grid Information & Telecommunication Co., Ltd., Beijing 100761, China

Abstract: The bidirectional DC-DC converter was selected as the research object. Based on the connection topology of energy storage and consumption components in the hybrid energy storage system, power demand indicators were determined for different energy flow directions, and the parameters of the main converter components and appropriate circuit components were established. A circuit model of buck/boost was constructed, and an adaptive fast terminal sliding mode control strategy was designed. The controller parameters were optimized using an improved genetic algorithm. Different control parameters have different control effects. In order to obtain better voltage output characteristics, the parameters of the adaptive fast terminal sliding mode control strategy were optimized. The proposed method can be verified to exhibit good control performance through simulation.

Key words: genetic algorithm, BP neural network, self disturbance rejection, Cuk converter, DC-DC

0 引言

在能源短缺和环境问题日益严重的情况下,

充分利用可再生资源显得尤为必要。而在这一过程中, 双向DC-DC转换装置是不可或缺的部件, 它可通过将各种新能源接入如电池、超级电容器



等储能装置中,达到对系统的有效控制与有效使用的目的。同时,高效率和高增益也是这类变换器的发展方向。此外,在不间断电源、启动/发电系统、光伏发电系统、航空电源系统、变电站空调系统等场合,高增益双向DC-DC变换器也同样扮演着重要角色^[1]。

文献[2]提出了一种通过级联来扩大两路转换器增益的方法,即通过两路转换器的增益乘积得到整个转换器的增益,但是经过多路转换后,系统效率下降,同时也面临多阶段的稳定问题。文献[3]采用了低压侧并联、高压侧串联的方式,可以扩大双向变换器的电压增益,并且减少低压侧电流纹波,但变换器结构比较复杂。另外,对于具有双向高增益的DC-DC变换器,其负荷变动与外部扰动常具有很大的不确定性与波动性,采用常规方法无法确保其对负荷与负荷大幅变动的动态特性,也无法实现性能的进一步提升。而模糊控制是一种不需要被控目标就可以建立准确的数学模型、具有较高鲁棒性的非线性智能控制方法^[4]。文献[5]将二维电压型模糊控制器用于双向Cuk电路中,这种控制方法利用输出电压的变化以及它的变化率调整开关管占空比,但是由于模糊计算过程与系统惯性等因素,它的动态响应比较缓慢,而且还存在稳态误差。为了对动态响应速度进行更深层次的提升,文献[6]加入负荷电流对负荷动态响应特性进行提升,但是与二维模糊逻辑控制器相比,模糊规则库的大小和复杂程度都更大。在确保调整准确性的前提下,可以使计算得到简化。文献[7]使用了符号定位法,把二维电压型模糊比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)控制器转化为单输入模糊PID控制器,用一个单一输入变量取代二输入模糊控制器的两个输入变量,就可以得到同样的模糊输出。

本文针对高可靠性隔离型双向Cuk变换器在变电站空调系统中的应用进行深入研究。首先,针对变电所空调系统中的高可靠度的隔离式双向

Cuk变换器,进行拓扑及工作机理的研究,并针对变电所各种运行方式的特性,选用相应的闭环控制方式;其次,确定变换器主要元件的参数和合适的电路元件,搭建降压/升压(buck/boost)电路模型,设计自适应快速终端滑模控制策略,提出改进遗传算法对控制器的参数进行优化,并搭建隔离型双向Cuk变换器的实验平台进行实验;最后,通过仿真验证所提出控制方法的正确性与有效性。

1 双向DC-DC变换器建模

1.1 电路拓扑结构

在实际的工程应用中,往往要求变换器的输入侧与输出侧之间是电气隔离的,在Cuk变换器拓扑的基础上进行3步变换,即可实现输入侧与输出侧之间的电气隔离,得到隔离型Cuk变换器拓扑结构,如图1所示^[8]。

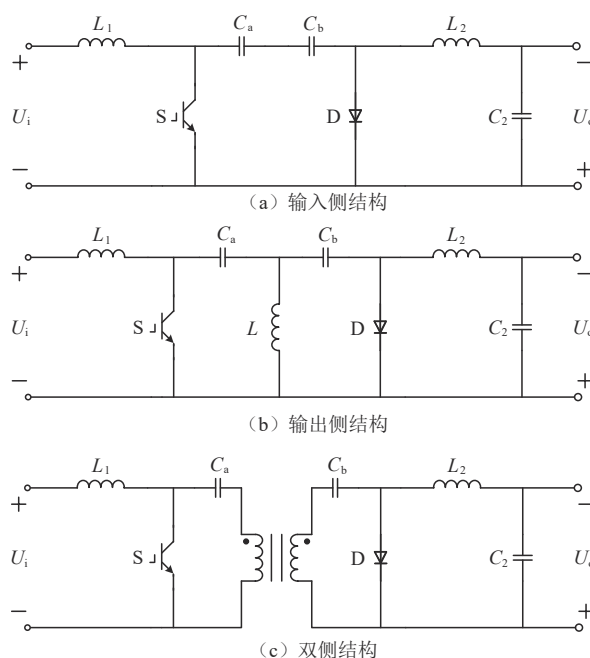


图1 隔离型Cuk变换器拓扑结构^[8]

1.2 隔离型Cuk变换器

隔离型Cuk变换器既实现了输入侧和输出侧的电气隔离,又保持了基本Cuk变换器的所有特性。但是,该变换器只能由一侧向另一侧进行单

方向功率变换,无法适用于电力双向流动的应用场景。基于隔离型Cuk变换器,仅需再经过一步变换就可以得到隔离型双向Cuk变换器,也就是在绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)两侧反并联功率二极管,也在二极管两侧反并联IGBT。

隔离型双向Cuk变换器是一种对称式的变换器,在每一个方向上都可以看作一个单向的变换器,且具有相同的拓扑结构。在 U_1 作为输入、 U_2 作为输出的工作模式下,可以将其看作一个由电感 L_1 、电感 L_2 、电容 C_a 、电容 C_b 、功率开关管 S_1 、功率二极管 D_2 与变压器组成的单向隔离型Cuk变换器,同样的,在 U_2 作为输入、 U_1 作为输出的工作模式下,可以将其看作另一个由 L_1 、 L_2 、 C_a 、 C_b 、 S_1 、 D_2 与变压器组成的单向隔离型Cuk变换器^[9]。

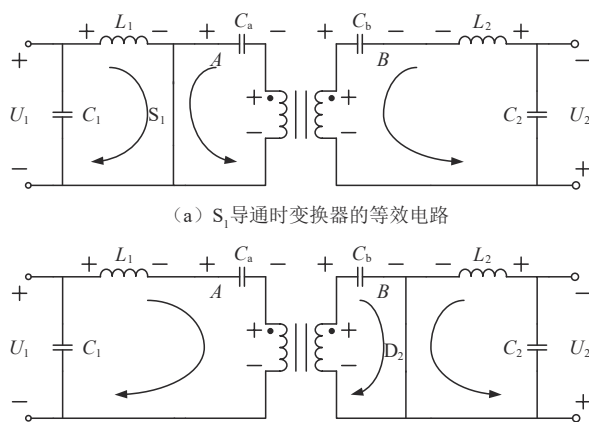
1.3 电路工作原理

由于隔离型双向Cuk变换器是对称式的拓扑结构,因此它在两个方向上的工作原理是一样的,本文将对 U_1 作为输入、 U_2 作为输出时的工作原理与换流过程进行详细分析。

不同情况下的等效电路如图2所示。在 U_1 作为输入、 U_2 作为输出的工作模式下, S_1 与 D_2 将处于正常的周期性开关状态,而 S_2 与 D_1 将一直处于关断的状态。当 S_1 导通时, D_2 反偏截止,变换器的等效电路如图2(a)所示。

图2中箭头所示的是电路中的电流回路,在输入侧, $U_1-L_1-S_1$ 回路、 C_a-S_1 -变压器原边回路流过电流,输入电压 U_1 直接对 L_1 充电,电容 C_a 对变压器原边放电,并在变压器副边产生感应电流;在输出侧, C_b -变压器副边- U_2-L_2 回路流过电流,电容 C_b 处于放电状态,与变压器副边的感应电流一起,提供输出电流,并对电感 L_2 充电。当开关管 S_1 关断时,二极管 D_2 正向导通,变换器的等效电路如图2(b)所示。

如图2(b)所示,在输入侧, $U_1-L_1-C_a$ -



(a) S_1 导通时变换器的等效电路

(b) S_1 关断时变换器的等效电路

图2 不同情况下的等效电路

变压器原边回路流过电流,电感 L_1 处于放电状态,与输入电压 U_1 一起对电容 C_a 充电,充电电流经过变压器原边,在变压器副边产生感应电流;在输出侧,变压器副边- C_b-D_2 回路、 $L_2-D_2-U_2$ 回路流过电流,变压器副边的感应电流对电容 C_a 充电, L_2 处于放电状态,提供输出电流。

假设图2中功率开关管 S_1 的开关周期为 T ,导通时间为 t_{on} ,关断时间为 t_{off} ,变压器为理想变压器,原副边的变比为 n ,且电容 C_a 、 C_b 足够大,使得其电压 U_{Ca} 、 U_{Cb} 的脉动足够小,可以将它们视为恒值。则当开关管 S_1 导通时:

$$U_1 = L_1 \frac{dI_{L1}}{dt} \quad (1)$$

$$U_{T1} = -U_{Ca} \quad (2)$$

$$U_{Cb} - U_{T2} - U_2 = L_2 \frac{dI_{L2}}{dt} \quad (3)$$

其中, U_{T1} 为 T_1 时刻的电压, U_{T2} 为 T_2 时刻的电压。

当开关管 S_1 关断时:

$$U_1 - U_{Ca} - U_{T1} = L_1 \frac{dI_{L1}}{dt} \quad (4)$$

$$U_{T2} = U_{Cb} \quad (5)$$

$$-U_2 = L_2 \frac{dI_{L2}}{dt} \quad (6)$$

由分析可知,当 S_1 导通时,电感 L_1 、 L_2 被充电,流过电感的电流增大,当 S_1 关断时,电感 L_1 、 L_2 对外放电,流过电感的电流减小。电感电



流在充放电的过程中可近似看作线性变化。当 S_1 导通时:

$$\frac{dI_{L_1}}{dt} = \frac{I_{L_1\max} - I_{L_1\min}}{t_{on}} \quad (7)$$

$$\frac{dI_{L_2}}{dt} = \frac{I_{L_2\max} - I_{L_2\min}}{t_{on}} \quad (8)$$

当 S_1 关断时:

$$\frac{dI_{L_1}}{dt} = \frac{I_{L_1\min} - I_{L_1\max}}{t_{off}} \quad (9)$$

$$\frac{dI_{L_2}}{dt} = \frac{I_{L_2\min} - I_{L_2\max}}{t_{off}} \quad (10)$$

将式 (7) 代入式 (1), 化简得:

$$I_{L_1\max} = \frac{U_1}{L_1} t_{on} + I_{L_1\min} \quad (11)$$

由于变压器原副边的变比为 n , 所以, 在任

$$U_{T_2} = nU_{T_1} \quad (12)$$

将式 (2)、式 (8)、式 (12) 代入式 (3), 化简得:

$$I_{L_2\max} = \frac{U_{C_b} + nU_{C_a} - U_2}{L_2} t_{on} + I_{L_2\min} \quad (13)$$

将式 (3)、式 (9)、式 (12) 代入式 (4), 化简得:

$$I_{L_1\max} = \frac{U_1 - U_{C_a} - \frac{1}{n}U_{C_b}}{L_1} t_{off} + I_{L_1\max} \quad (14)$$

将式 (10) 代入式 (6), 化简得:

$$I_{L_2\min} = -\frac{U_2}{L_2} t_{off} + I_{L_2\max} \quad (15)$$

将式 (11) 与式 (14) 相加, 化简得:

$$U_1 T = (U_{C_a} + \frac{1}{n}U_{C_b}) t_{off} \quad (16)$$

将式 (13) 与式 (15) 相加, 化简得:

$$U_2 T = (nU_{C_a} + U_{C_b}) t_{on} \quad (17)$$

由式 (16) 与式 (17) 可得:

$$U_2 = n \frac{t_{on}}{t_{off}} U_1 = n \frac{t_{on}}{T - t_{on}} U_1 = n \frac{\alpha}{1 - \alpha} U_1 \quad (18)$$

其中, $\alpha = \frac{t_{on}}{T}$ 为功率开关管 S_1 的导通占空比。

1.4 自抗扰观测器设计

根据选定的控制变量在控制器开启结构下建立微分方程, 选定的两个控制变量分别为电感电流 I_L 和输出电压 V_o , 根据控制器结构特点, 将控制器的输入输出微分方程转化为 I_L 和 V_o 的微分方程, 从而获取两个变量状态观测器, 进而使用李雅普诺夫函数确定输入电压和负载电阻的自适应规则, 最后建立整体的状态观测器^[10]。已知 buck 电路的数学模型得到电流和电压的观测器如下。

$$\begin{cases} \frac{dI_L}{dt} = \frac{V_{in}u}{L} - \frac{V_o}{L} + \alpha_1 I_L \\ \frac{dV_o}{dt} = \frac{I_L}{C} - \frac{GV_o}{C} + \alpha_2 V_o \end{cases} \quad (19)$$

$$V_1 = 0.5 \left(LI_L^2 + CV_o^2 + \frac{G^2}{\beta_1} + \frac{V_{in}^2}{\beta_2} \right) \quad (20)$$

为了得到输入电压和负载电导的自适应规则, 对李雅普诺夫函数求导, 得到:

$$\dot{V} = -LI_L^2 - CV_o^2 - GV_o^2 - G \left(V_o^2 + V_o \tilde{V}_o + \frac{\dot{G}}{\beta_1} \right) + V_{in} \left(I_L u - \frac{\dot{V}_{in}}{\beta_2} \right) \quad (21)$$

$$\text{令 } V_{in} \left(I_L u - \frac{\dot{V}_{in}}{\beta_2} \right) = 0, \quad G \left(V_o^2 + V_o \tilde{V}_o + \frac{\dot{G}}{\beta_1} \right) = 0,$$

求得自适应规则为: $V_{in} = \beta_2 I_L u$, $\dot{G} = -\beta_1 (V_o^2 + V_o \tilde{V}_o)$, 其中 L 为电感、 C 为电容、 R 为电阻、 V_{in} 为输入电压、 G 为电导。

2 算法控制策略设计

2.1 遗传算法

传统遗传算法是一种基于达尔文生物进化论和孟德尔遗传学说发展起来的可并行化处理和全局搜索的高效优化算法, 它克服了传统算法容易陷入局部最优解的缺点, 被广泛应用于组合优化和自动控制等领域。遗传算法的基本运算过程为: 编码、个体评价、选择、交叉和变异。编码是指用遗传空间的染色体或个体来表示要求解的问题, 常用方法有二进制编码和实数编码等; 个

体评价是指通过适应度函数对每一个染色体进行度量,以区分出最优个体,淘汰最差个体;选择是以个体适应度为标准选择出最优秀的个体进行后续操作;交叉是模拟生物染色体交配重组,通过染色体的交叉产生新的个体;变异是模仿生物进化的基因突变,可以产生新的染色体,促进群体进化。新群体继承上一代的信息,优于上一代,反复循环,直到满足条件。遗传算法流程如图3所示^[11]。

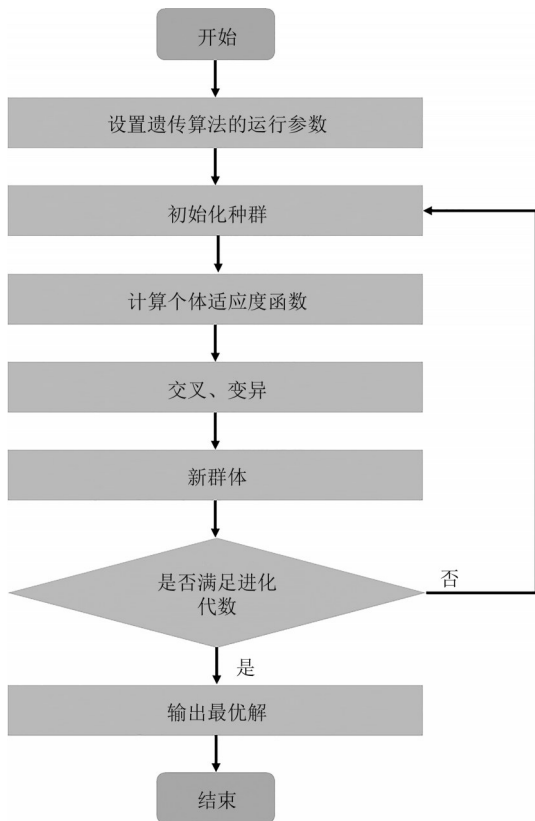


图3 遗传算法流程^[11]

2.2 BP神经网络

反向传播 (back propagation, BP) 神经网络是前向网络的关键部分,并且是实现人工神经网络最重要的部分。其训练规则是使用最速下降法,并通过误差传播连续调整网络的权重和偏移,以最小化网络传播与预期输出之间的平方误差之和。BP神经网络模型的拓扑包括输入层、

隐藏层和输出层。每个节点层的输出仅影响下一层中的节点,每层神经元节点的激活函数通常是双曲线,而输出层中神经元节点的激活函数通常是线性函数。通过添加具有输出层、隐藏层和输出层的BP神经网络模型,以及添加隐藏层和隐藏层神经元节点,BP神经网络可以以任意精度近似逼近非线性函数图。也就是说,所有层中的神经元都连接到上一层中的所有节点,并且信号逐渐在层与层之间传播^[12]。

BP神经网络步骤如下。

步骤1 输入样本,并使用事先确定的激励函数计算各节点的实际输出值:

$$o = f(wx) \quad (22)$$

其中, w 为相应的连接权值,其导数形式为:

$$f'(x) = \lambda f(x)(1 - f(x)) \quad (23)$$

步骤2 使用以下误差函数公式计算网络在第 k 个样本上的误差瞬时值:

$$E_n(w) = \frac{1}{2} \sum_{k \in \text{outputs}} (t_k - o_k)^2 \quad (24)$$

其中, t_k 为样本中的期望输出值, o_k 为输出层的实际输出值。

步骤3 计算输出层中每个输出节点的误差项:

$$\delta_k = o'_k(t_k - o_k) = o_k(1 - o_k)(t_k - o_k) \quad (25)$$

其中, o'_k 为输出层下一个节点的实际输出值。

步骤4 计算隐藏层中每个隐藏节点的误差项:

$$\delta_h = o'_h \sum_{k \in \text{outputs}} w_{kh} \delta_k = o_h(1 - o_h) \sum_{k \in \text{outputs}} w_{kh} \delta_k \quad (26)$$

其中, $\sum_{k \in \text{outputs}}$ 为隐藏节点求和, o_h 为隐藏层的实际输出值。

步骤5 计算各连接权的修正值:

$$\Delta w_{ji} = \eta \delta_j x_{ji} \quad (27)$$

其中, η 为学习率,较小的 η 可以保证训练能更稳定地收敛,较大的 η 可以在某种程度上提高收



收敛速度, x_{ji} 为节点 i 到节点 j 的输出。

步骤6 调整各连接权的权值, 并返回步骤1:

$$w_{ji} = \Delta w_{ji} + w_{ji} \quad (28)$$

学习的目的是调整网络的连接参数最小化网络的均方误差:

$$E_{av} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N E_n(w) \quad (29)$$

其中, E_{av} 表示的代价函数作为学习性能的一个度量, N 为样本总数。

2.3 改进遗传算法

基于遗传算法优化的BP神经网络算法流程如图4所示, 步骤如下。

步骤1 权值和阈值在BP神经网络中都有一定的次序级联, 包括由 N 位染色体组型随机生成的输入层与隐藏层连接权值、隐藏层阈值、隐藏层与输出层连接权值、输出层阈值, 将这些BP神经网络的权值和阈值都按次序级联出来。

步骤2 利用适应度函数选择均方误差, 然后再利用均方误差对染色体的适合度进行测算,

以确定预计结论是不是满足目标条件, 如果满足条件, 则转至步骤4。

步骤3 生成新个体, 具体操作是对符合适应度值条件的新个体进行变异、交叉、复制计算。

步骤4 确认新个体能否满足均方误差值函数的所有条件, 如果不符合则转到步骤2, 否则转步骤5。

步骤5 按顺序划分最优解个体, 并将BP神经网络的权值和阈值进行更替。

步骤6 正向传播的BP神经网络中, 预测了全局偏差, 以及对BP神经网络的循环练习, 实现原先拟定的练习次数和精度条件, 输出结果, 该算法结束。

3 仿真分析

3.1 参数设置

本文在 MATLAB/Simulink 环境下, 应用 SimPowerSystem 模型库对隔离型双向 Cuk 变换器的系统设计方案进行了仿真与分析, 系统升压、降压模式仿真模型如图5所示, 参数设置见表1^[13]。

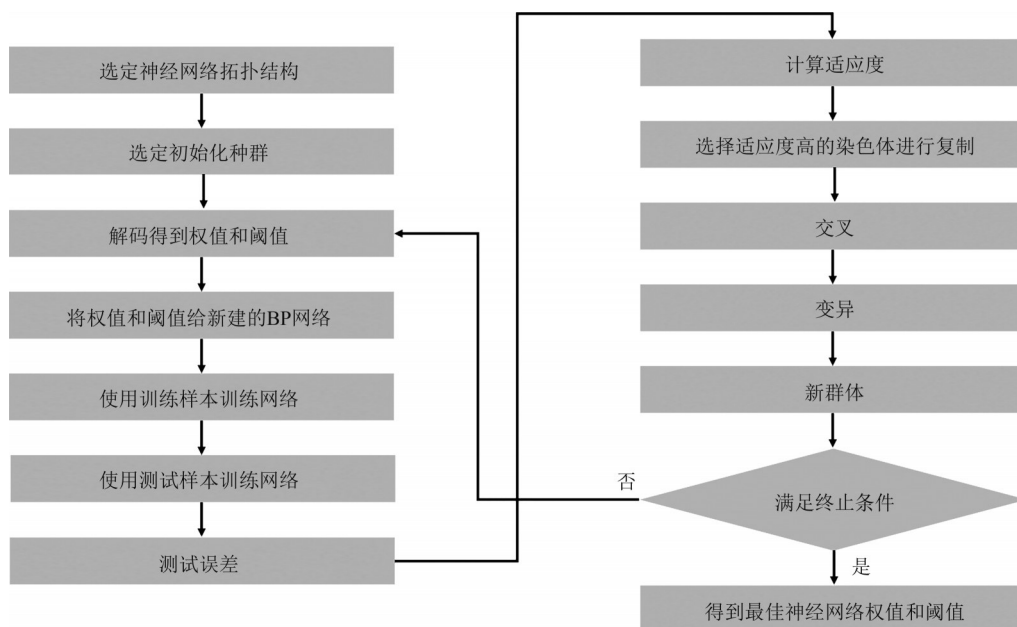


图4 基于遗传算法优化的BP神经网络算法流程

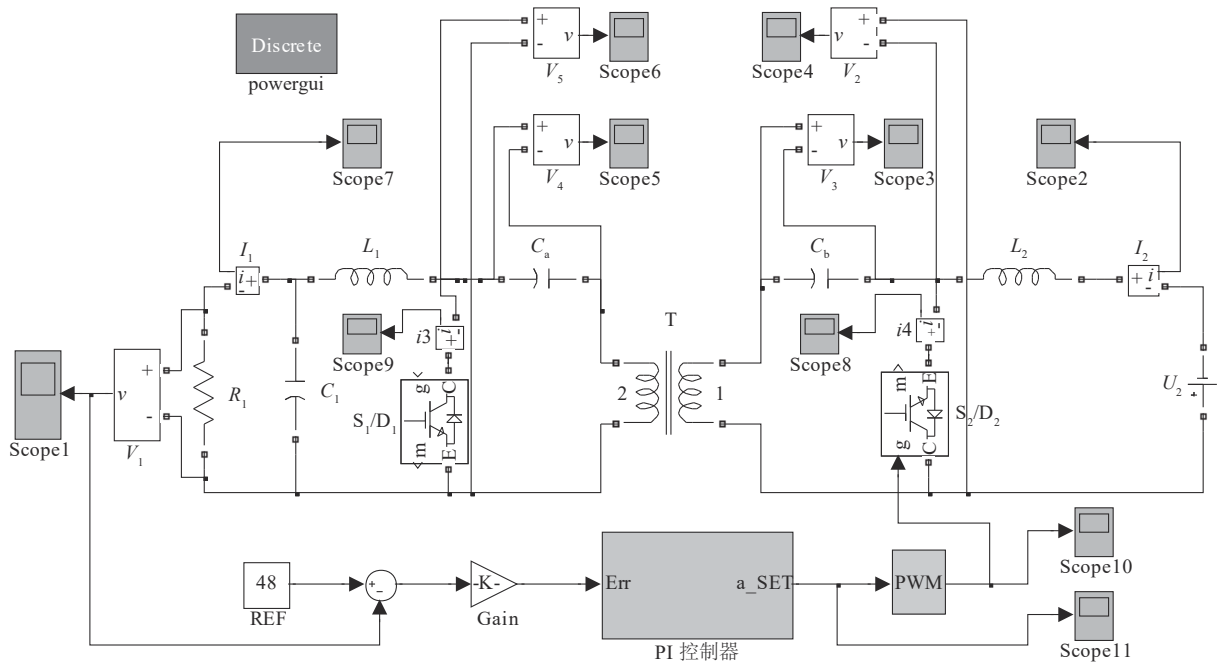
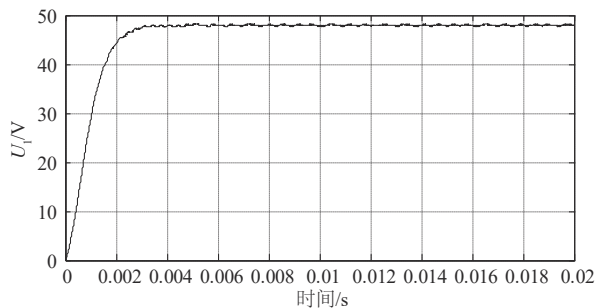


图5 系统升压、降压模式仿真模型

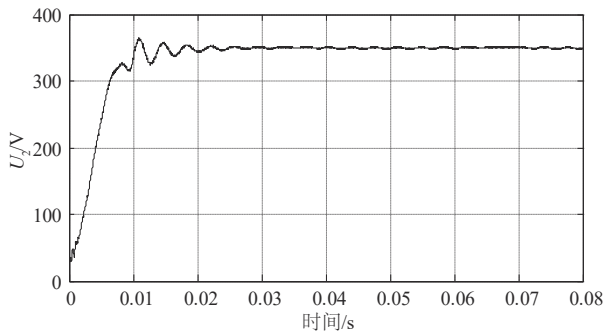
表 1 隔离型双向Cuk变换器实验参数^[13]

参数	设定值 1	设定值 2
输入电压/V	350	48
输出电压/V	48	350
输入、输出侧电感/mH	2	2
中间电容/ μF	4.4	4.4
输出电容/ μF	10	2.3
高频变压器变比	2 : 1	1 : 2
负载电阻/ Ω	7.53	410
额定功率/ Ω	300	300
系统开关频率/kHz	40	40

通过仿真，得到理想状态下系统升压和降压过程曲线，如图6所示。在理想情况下，系统升压和降压的过程中没有产生超调，说明系统比较稳定，响应时间比较快。但是由于DC-DC转换器在实际运行过程中可能会受到来自外界的扰动，升压、降压时会产生一定的超调，并且响应时间和调节时间会变长，因此需要改变升压、降压策略，引入算法和自抗扰模型，减小超调量，并减少响应时间和调节时间，基于遗传算法优化的BP神经网络算法升压、降压策略如图7所示^[14]。



(a) 升压过程曲线



(b) 降压过程曲线

图6 理想状态下系统升压和降压过程曲线

遗传算法参数和BP神经网络参数设定见表2、表3，升压、降压策略BP神经网络拓扑结构和误差损失随迭代次数的变化规律如图8、图9所示。

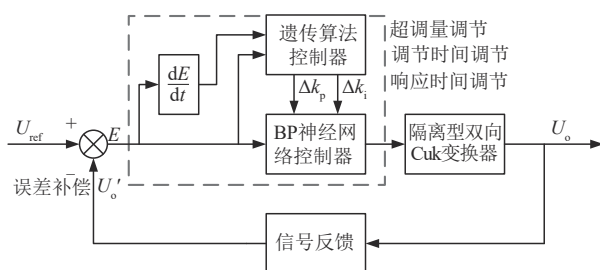
图7 基于遗传算法优化的BP神经网络算法升压、降压策略^[14]

表2 遗传算法参数设定

参数	设定值
变量个数/个	4
种群大小	40
最大遗传代数	50
最大交叉概率	0.7
最小交叉概率	0.07
最大变异概率	0.10
最小变异概率	0.01
变异概率代沟	0.95

表3 BP神经网络参数设定

参数	设定值
训练次数	300
学习率	0.1
训练精度	0.000 01
训练函数	trainlm
传递函数	tan-sigmoid

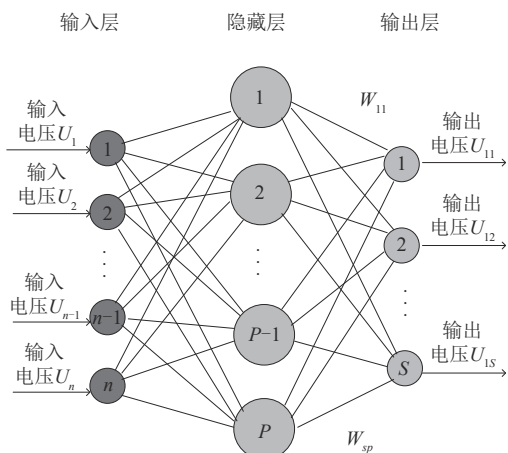


图8 升压、降压策略BP神经网络拓扑结构

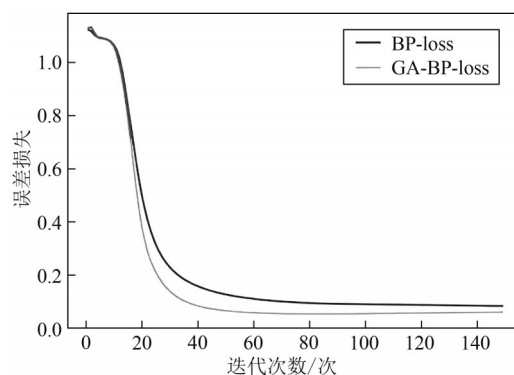
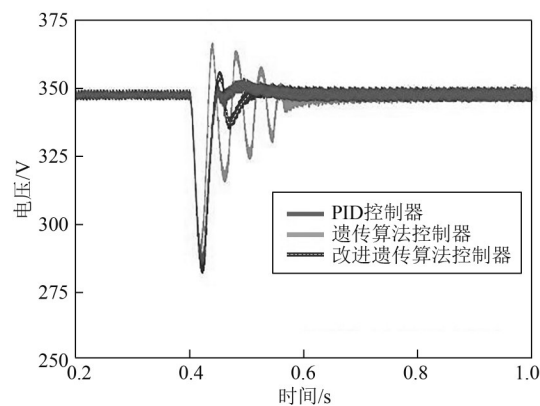


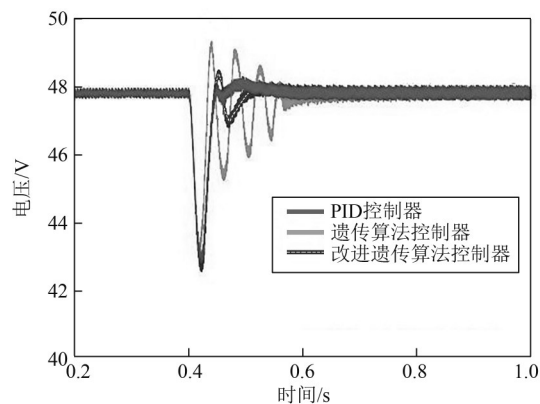
图9 误差损失随迭代次数的变化规律

3.2 升压工况

当隔离型双向Cuk变换器的 U_1 作为输入、 U_2 作为输出时,系统工作在升压模式。在升压过程中添加一个突增40%的负载干扰,观察升压过程中的曲线变化。图10(a)展示了在突增40%的负载干扰状态下,传统PID控制器、遗传算法



(a) 升压过程



(b) 降压过程

图10 升压、降压过程中突增40%的负载干扰状态

控制器和改进遗传算法控制器的升压策略效果,可以看出采用改进遗传算法控制器的升压策略可以更好地抵消负载干扰带来的影响^[15]。

3.3 降压工况

当隔离型双向 Cuk 变换器的 U_2 作为输入、 U_1 作为输出时,系统工作在降压模式。在降压过程中添加一个突增 40% 的负载干扰,观察升压过程中的曲线变化。图 10 (b) 展示了在突增 40% 的负载干扰状态下,传统 PID 控制器、遗传算法控制器和改进遗传算法控制器的降压策略效果,可以看出采用改进遗传算法控制器的降压策略同样可以更好地抵消负载干扰带来的影响。

4 结束语

本文针对高可靠性隔离型双向 Cuk 变换器,分析其拓扑结构、工作原理,并根据变换器在降压、升压模式下的不同特点,分别设计了相应的闭环控制策略,应用 Simulink 仿真软件搭建了隔离型双向 Cuk 变换器的系统仿真模型,进行仿真研究。设计了自适应快速终端滑模控制策略,并改进遗传算法对控制器参数进行了优化。为了获得更好的电压输出特性,改进遗传算法对自适应快速终端滑模控制策略进行参数优化,并进行仿真,验证得出该方法具有良好的控制性能。特别是当升压或降压过程中突增 40% 的负载干扰状态时,采用本文改进的算法仍然能减少升压或降压过程中的超调量和调节时间,提高系统的响应速度。

参考文献:

- [1] 刘畅,卓建坤,赵东明,等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 1-18.
LIU C, ZHUO J K, ZHAO D M, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 1-18.
- [2] 焦尚彬,张磊,刘丁,等. 基于增量式切换项的模糊滑模高频开关电源控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(22): 5311-5318.
JIAO S B, ZHANG L, LIU D, et al. Fuzzy sliding mode control of high frequency switching power supply based on incremental switch item[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(22): 5311-5318.
- [3] 侯旭,曾正,冉立,等. 基于扩展移相控制的双向有源桥变换器回流功率优化[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 7004-7014, 7134.
HOU X, ZENG Z, RAN L, et al. Backflow power optimization of dual active bridge converter based on extended-phase-shift control[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 7004-7014, 7134.
- [4] 李洪珠,杨学鹏,张馨瑜,等. 交错并联磁集成开关电感双向 DC/DC 变换器[J]. 电力电子技术, 2016, 50(4): 17-21, 81.
LI H Z, YANG X P, ZHANG X Y, et al. Interleaving magnetic integrated Bi-directional DC/DC converter with switched inductor[J]. Power Electronics, 2016, 50(4): 17-21, 81.
- [5] 薛利坤,王萍,王议锋,等. 基于开关电容和耦合电感的交错并联型高电压增益双向 DC-DC 变换器[J]. 电工技术学报, 2016, 31(24): 181-187, 194.
XUE L K, WANG P, WANG Y F, et al. Interleaved high gain bi-directional DC-DC converter with switched capacitor and coupled inductor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(24): 181-187, 194.
- [6] 林维明,郭晓君,黄超. 改进单周期控制策略的双向大变比 DC-DC 开关变换器[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(21): 31-37.
LIN W M, GUO X J, HUANG C. Bi-directional DC-DC converters with large conversion ratio based on improved one-cycle control[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(21): 31-37.
- [7] MENG Y Q, KONG Y, LI J, et al. An isolated modular multi-level AC/AC converter with high-frequency link and pulse flip circuit for fractional frequency transmission system application[J]. IET Power Electronics, 2022, 15(16): 1814-1830.
- [8] 马晓亮,刘英,高洁. 基于联合神经网络的投诉预测模型研究[J]. 电信科学, 2024, 40(1): 48-58.
MA X L, LIU Y, GAO J. Research on a complaint prediction model utilizing joint neural networks[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(1): 48-58.
- [9] 余竞航,赵一辰,宋浒. 基于强化学习的边缘计算智能电网资源调度算法[J]. 电信科学, 2024, 40(1): 115-122.
YU J H, ZHAO Y C, SONG H. Edge computing smart grid resource scheduling algorithm based on reinforcement learning[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(1): 115-122.
- [10] 商天文,仇健维,黄昊晨. 基于 BPNN 回归预测算法的专家数量预测模型[J]. 电信科学, 2023, 39(12): 152-160.



SHANG T W, ZHANG J W, HUANG H C. Expert number prediction model based on BPNN regression algorithm[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(12): 152-160.

- [11] 周强, 张晓忠, 陈久益, 等. 基于遗传算法小波神经网络的光伏电站发电量预测方法[J]. 智慧电力, 2024, 52(4): 78-84.

ZHOU Q, ZHANG X Z, CHEN J Y, et al. Power generation forecasting methods of photovoltaic power plants based on genetic wavelet neural network method[J]. Smart Power, 2024, 52(4): 78-84.

- [12] 黄荣杰, 王亚刚. 基于可视图与改进遗传算法的机器人平滑路径规划[J]. 控制工程, 2024, 31(4): 678-686.

HUANG R J, WANG Y G. Smooth path planning for robot based on visibility graph and improved genetic algorithm[J]. Control Engineering of China, 2024, 31(4): 678-686.

- [13] 姚帅, 曹伟, 林丽, 等. 基于遗传算法的四旋翼姿态模糊PID控制研究[J]. 机械设计与研究, 2024, 40(2): 51-55, 68.

YAO S, CAO W, LIN L, et al. Research on fuzzy PID control of quadcopter attitude based on genetic algorithm[J]. Mechanical Design and Research, 2024, 40(2): 51-55, 68.

- [14] 王保民, 闫瑞翔, 房文博, 等. 基于遗传算法的风电齿轮传动系统参数优化设计[J]. 兰州理工大学学报, 2024, 50(2): 31-35.

WANG B M, YAN R X, FANG W B, et al. Parameter optimization design of gear transmission system in wind turbine based on genetic algorithm[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2024, 50(2): 31-35.

- [15] 沈璐, 陈修和, 陶文斌, 等. 基于遗传算法的BP神经网络在轻质路基沉降预测中的应用[J]. 广西科技大学学报, 2024, 35(2): 32-39.

SHEN L, CHEN X H, TAO W B, et al. Application of BP neural network based on genetic algorithm in predicting settlement of lightweight subgrade[J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology, 2024, 35(2): 32-39.

[作者简介]



李黎 (1985-), 男, 国家电网有限公司信息通信分公司高级工程师, 主要研究方向为电力通信系统运行维护。



陈灿 (1987-), 女, 国家电网有限公司信息通信分公司高级工程师, 主要研究方向为电力通信系统运行维护。



李灿 (1993-), 女, 国家电网有限公司信息通信分公司高级工程师, 主要研究方向为电力通信系统运行维护。



高菲璠 (1989-), 女, 国家电网有限公司信息通信分公司高级工程师, 主要研究方向为电力通信系统运行维护。



陈拽霞 (1988-), 女, 国家电网有限公司信息通信分公司高级工程师, 主要研究方向为电力通信系统运行维护。



刘洋 (1981-), 女, 国家电网有限公司信息通信分公司高级工程师, 主要研究方向为电力通信系统运行维护。



周鸿喜 (1975-), 男, 国家电网有限公司信息通信分公司高级工程师, 主要研究方向为电力通信系统运行维护。