

基于改进遗传PI和重复控制的 三相逆变器并网研究

吴 斌, 杨旭红

(上海电力大学自动化工程学院, 上海 200090)

摘 要:比例积分(PI)控制技术可以快速跟踪并网电流,但由于逆变器包含电力电子开关器件,因而导致谐波电流含量高。此外,PI参数在调节过程中难以达到最优,更加剧了并网电流的畸变。为了得到更好的性能,一种改进的遗传算法被用来优化PI控制的参数。这种算法通过计算并网电流和给定电流的误差,构建电流适应度函数,迭代得到最优PI参数,从而降低并网电流畸变率。结合重复控制技术,构建特定频率陷波器和二阶低通滤波器,提高稳态性能。通过MATLAB/Simulink仿真平台,建立LC型滤波的逆变器并网模型,仿真分析并比较PI、PI结合重复、改进遗传PI结合重复3种控制策略的结果,验证所提控制策略的有效性。

关 键 词:重复控制;改进遗传算法;适应度函数;二阶陷波器;逆变器并网

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.06.018 中图分类号:TM464 文章编号:1673-9140(2021)06-0151-06

Research on grid-connected three-phase inverter based on improved genetic PI and repetitive control

WU Bin, YANG Xuhong

(Automation Engineering of Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: PI control can rapidly track the grid-connected current, however, the harmonic components of current are high due to the power electronic device of the inverter. In addition, PI parameters are difficult to adjust in practical application, and it is difficult to achieve optimization in the regulation process, which exacerbates the distortion of grid connected current. To achieve the best possible performance, an improved genetic algorithm is considered to optimize parameters of PI control. By calculating the error of practical current with setting current, this algorithm builds the current fitness function. The optimal PI parameters are obtained by iterating remarkably and the distortion rate is reduced. The combination of repetitive control technique significantly improves the steady performance by building the specific frequency notch filter and second order low pass filter. Through Matlab/Simulink, a model of grid-connected inverter with LC filter is built and the performances of the three control strategies of PI control, PI repetitive control and improved genetic PI repetitive control are compared to verify the effectiveness of proposed control strategy.

Key words: repetitive control; improved genetic algorithm; fitness function; specific frequency notch filter; grid-connected inverter

收稿日期:2018-04-26;修回日期:2018-08-16

基金项目:国家自然科学基金(61203224);上海自然科学基金(13ZR1417800);上海市重点科技攻关计划(14110500700)

通信作者:杨旭红(1969-),女,博士,教授,主要从事新能源电网控制、核电和火电机组的仿真及控制技术研究;E-mail:yangxuhong_sh@163.com

随着环境不断污染和能源日渐枯竭,近年来光伏发电一直备受瞩目,但其发电功率波动性大,不加选择并入电力系统容易影响系统稳定性。因此,光伏逆变器作为电网接口设备,要具备一定的标准,要求注入电网的电流谐波总畸变率限值为5%,谐波越小越好^[1]。逆变器的电流控制策略主要有比例积分(PI)控制、比例谐振(PR)控制、准比例谐振(QPR)控制、重复控制和无差拍控制等。PI控制具备很好的快速性和稳定性,但控制系统存在非线性和不确定因素,难以得到优良的控制效果^[2]。PR控制能够在静止坐标下跟踪交流量,因为在电网基频下增益无穷大,但数字实现较难,且电网频率有±0.5 Hz波动时,增益减小显著^[3-4]。QPR控制可以解决PR控制的问题,能够在基频附近增益较大,但当电网出现不平衡时,参考电流会引入谐波,从而使并网电流出现谐波^[5]。重复控制是基于内膜原理的一种控制。内膜是指在稳定的闭环控制系统中植入外部输入信号的数学模型,这样可以达到无静差跟踪的目的^[6-7]。当控制系统的输入信号趋于零时,要保证继续输出适当的控制信号,维持合适的控制作用。若误差信号为零,则信号通路会断开,如果控制器包含能反映外部信号的模型,则系统就会继续响应。无差拍控制是一种针对于离散采样系统而提出的预测控制算法,其控制精度主要有 $k+1$ 时刻的预测补偿电流值的精度所决定,由于预测的方法不同,精度就不同,可能导致系统稳定精度低^[8]。

该文采用改进遗传PI和重复控制相结合的方法。一方面通过改进的遗传算法优化PI参数,进一步降低电流谐波,同时保证系统具有较快的动态响应;另一方面采用重复控制,提高系统稳态精度。

1 三相逆变器的拓扑结构

LC型滤波器的三相逆变器并网的主电路拓扑如图1所示, V_{dc} 为等效光伏阵列最大功率点得出的电压, e_a 、 e_b 和 e_c 为三相电网电压。 L 和 C 分别为逆变侧滤波电感、电容, i_1 、 i_2 和 i_c 分别为逆变输出、并网和电容电流。

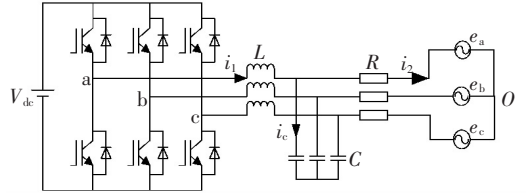


图1 LC型滤波器三相逆变器并网拓扑
Figure 1 Topology diagram of LC filter three-phase grid-connected inverter

忽略电容电流,在三相静止坐标系下,逆变器可建立数学模型^[9]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} - \frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 i_a 、 i_b 、 i_c 为三相电感电流; u_a 、 u_b 、 u_c 为三相逆变器输出电压; e_a 、 e_b 、 e_c 为三相电网电压; L 、 R 为滤波电感和线路电阻。

式(1)中都是交流量,不利于控制,通过坐标变换可转换为旋转坐标系中的直流量。如图2所示, d 轴以角速度 ω 逆时针旋转, ω 为电网角频率。

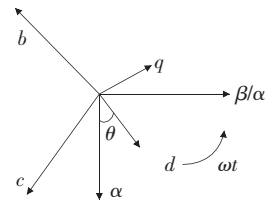


图2 坐标变换矢量

Figure 2 Coordinate transformation vector diagram

由等幅和等功率变换可得^[10]:

$$\begin{pmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 0 & -\sqrt{\frac{3}{2}} & \sqrt{\frac{3}{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中, θ 为 d 轴超前 α 轴的角度,式(2)、(3)也可用于电压变换。

当为理想电网时,即三相对称,式(1)由坐标变换得^[11]:

$$\begin{cases} i_d R + L \frac{di_d}{dt} = v_d + \omega L i_q - e_d \\ i_q R + L \frac{di_q}{dt} = v_q - \omega L i_d - e_q \end{cases} \quad (4)$$

式(4)表明,旋转坐标轴间存在耦合,必须进行解耦。可将式(4)等号左边作为 PI 控制器的输出量,等号右边非同轴量补偿解耦,如图 3 所示。

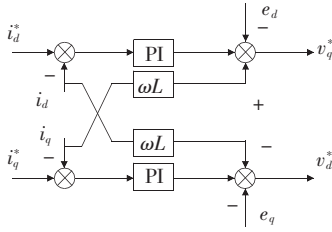


图 3 补偿解耦示意

Figure 3 Schematic diagram of compensation decoupling

2 复合控制器设计

2.1 重复控制器设计

重复控制对于存在周期性扰动的系统具有很好的控制效果。逆变器系统的周期性扰动主要有开关死区和电网电压等,通过重复控制抑制周期性扰动。

重复控制器的数学模型^[11]为

$$G(z) = \frac{z^{-N}G_c(z)}{1 - Qz^{-N}} \quad (5)$$

式中 z^{-N} 为延迟环节; N 为一个周期采样的次数; $G_c(z)$ 为补偿器; Q 为内膜误差反馈系数。

采样频率设为 10 kHz,电网频率为 50 Hz,一个周期采样次数 $N = 200$;误差反馈系数 Q 一般取小于 1 的常数以保证系统稳定收敛。 $G_c(z)$ 作为补偿器提供幅值和相位补偿。

$$G_c(z) = K_r z^k S_1(z) S_2(z) \quad (6)$$

式中 K_r 为重复控制的增益; z^k 为超前环节补偿; $S_1(z)$ 为二阶陷波器; $S_2(z)$ 为二阶低通滤波器。

系统复合控制结构如图 4 所示,其中改进遗传 PI 控制和重复控制分开设计。

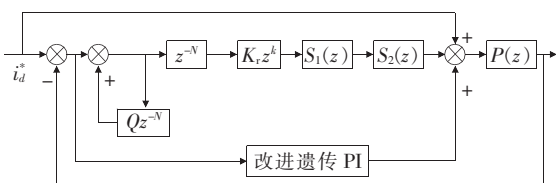


图 4 改进遗传 PI 和重复控制结构

Figure 4 Structure diagram of improved genetic PI repetitive control

当逆变器为空载时,阻尼最小最容易震荡。只要保证空载时系统稳定,则负载时也就稳定。空载时逆变器的传递函数为

$$P(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (7)$$

式中 ω_n 为系统自然频率, $\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}}$; ξ 为阻尼比, $\xi = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$ 。

将系统参数 $L = 8 \text{ mH}$ 、 $C = 2 \text{ } \mu\text{F}$ 、 $R = 0.1 \text{ } \Omega$ 代入式(7),得 $\omega_n = 7\ 911.4 \text{ rad/s}$,有

$$P(s) = \frac{7\ 911.4^2}{s^2 + 2 \times 0.008 \times 7\ 911.4s + 7\ 911.4^2}$$

离散化得:

$$P(z) = \frac{0.296\ 8z + 0.296\ 7}{z^2 - 1.405z + 0.998\ 7}$$

补偿器中的重复控制增益 K_r 一般取小于 1 的常数,用于控制补偿量的强度,其值越大误差的收敛速度越快,稳态误差越小,但系统的稳定裕度就越小,该文取 0.8。超前环节用于补偿陷波器和滤波器引起的相位偏移。

通常选择梳状滤波器作为陷波器,抑制谐振峰值,其离散传递函数为

$$F(z) = \frac{z^n + 2 + z^{-n}}{4} \quad (8)$$

考虑到 n 只能取整数,这就导致陷波频率点不能和谐振峰值绝对吻合,导致抑制效果不好。该文选取特定频率点的二阶陷波器,能够根据谐振频率点进行陷波^[12],表达式为

$$G(s) = \frac{s^2 + \omega^2}{s^2 + q\omega s + \omega^2} \quad (9)$$

式中 q 为陷波器开口系数; ω 为陷波频率。

陷波器开口系数 q 取 0.9,离散化得:

$$S_1(z) = \frac{z^2 - 1.524z + 0.948\ 9}{z^2 - 1.066z + 0.490\ 7} \quad (10)$$

选取二阶低通滤波器对高频谐波进行滤波,其表达式为

$$G(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (11)$$

式中 ω_0 为截止频率; ξ 为阻尼比。

截止频率取 8 000 rad/s,阻尼比取 0.707。离

散化得:

$$S_2(z) = \frac{0.2161z + 0.1475}{z^2 - 0.959z + 0.3226} \quad (12)$$

从图 5 幅频图可以看出,二阶陷波器很好抑制了逆变器谐振峰值。对于超前环节的选取,需根据中低频段相位补偿的效果合理选择 k 值,该文选取 $k=10$,能对系统相位进行补偿。

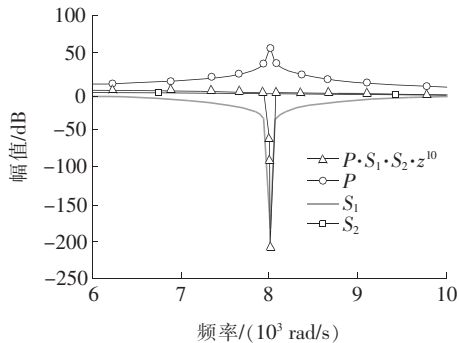


图 5 控制器伯德图

Figure 5 Bode diagram of controller

2.2 改进遗传 PI 控制器设计

在传统 PI 控制中,参数设置往往依靠经验,根据每次调试的效果不断改变参数值,调试过程繁琐^[13]。遗传算法是模拟生物界遗传现象产生的一种算法^[14]。首先需产生一个初始种群,初始种群应尽量多,避免落入局部最优解,扩大搜索空间和收敛到全局最优解。要得到好的初始解,可采用均匀设计法,使初始种群的各个个体之间保持一定的距离,PI 参数的初始种群个体采用算术采样法,即平均采样法。另外,在传统遗传算法的基础上加以改进,使“选择”、“交叉”、“变异”每次运算后都包含上次适应度最高的个体解,以保证解的优异性。

PI 的 2 个参数 k_p 和 k_i 作为遗传算法的一个个体,每个参数用 7 位二进制数表示,2 个参数即为 14 位二进制数。二进制数位越多,数值的精度就越高。

选取实际输出电流与给定标准电流的误差模拟谐波电流,三相对称可以选取其中一相:

$$\epsilon(t) = |i^*(t) - i(t)| \quad (13)$$

式中 $i^*(t)$ 为给定一相电流; $i(t)$ 为实际一相电流。

适应度函数值越大,表示个体 PI 参数越好,表明谐波电流越小,选取表达式:

$$f_i = 1 / \sum_{n=0}^{n=N} \epsilon(t) \quad (14)$$

式中 n 为第 n 个采样时刻。

每个采样周期计算一次误差,可以设置每 5 个电网电压周期求和一次得到适应度值,采样周期为 10^{-5} s, N 等于 $0.02 \times 5 / 10^{-5}$,即 10^4 。

算法流程如图 6 所示,可以根据函数的适应度值判断是否要进行循环,也可根据迭代代数判断,一般可以取 100 代,误差能够收敛。如图 7 所示,当遗传算法迭代到 60 代后误差趋于稳定,即可以输出最优 PI 参数。

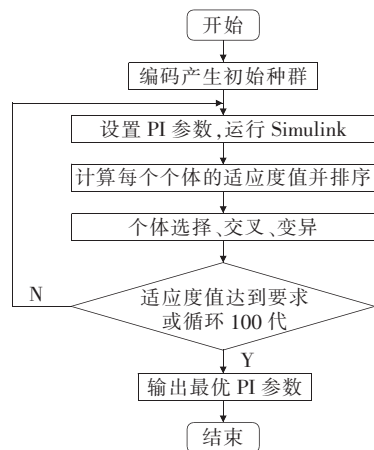


图 6 改进遗传 PI 算法流程

Figure 6 Flowchart of improved genetic PI algorithm

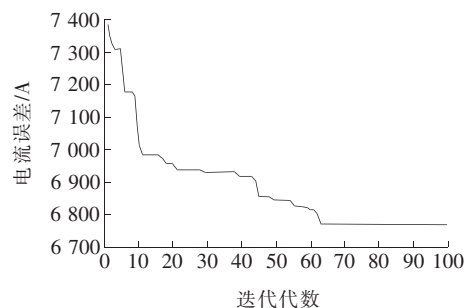


图 7 遗传迭代 100 代的误差

Figure 7 Error of 100 generations genetic iteration

3 控制策略仿真及比较

选取 3 种控制策略进行比较,分别是 PI、PI 结合重复以及改进遗传 PI 结合重复控制。依据《NB/T 32004—2013 光伏发电并网逆变器技术规范》,并网电流总谐波畸变率应 $\leq 5\%$ 。

系统参数如表 1 所示。给定电流在 $0 \sim 0.1$ s 时为 20 A,0.1 s 后突变为 40 A,PI 参数依据经验

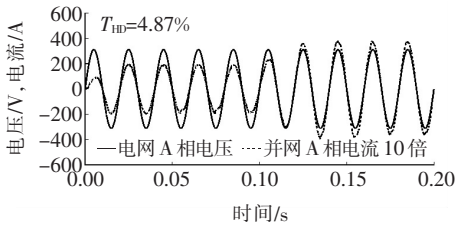
调试后分别为 $k_p = 4.4$ 、 $k_i = 0.5$ 。当给定电流为 20 A 时,改进遗传算法得到的 PI 参数分别为 $k_p = 3.9077$ 、 $k_i = 0.1315$,当给定电流为 40 A 时,改进遗传算法得到的 PI 参数分别为 $k_p = 4.9487$ 、 $k_i = 0.3833$ 。

表 1 系统参数

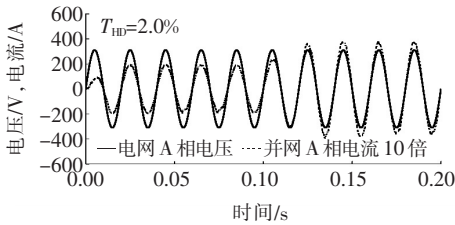
Table 1 The system parameters

采样频率/kHz	电网频率/Hz	滤波电容/ μF	传统 PI 参数		开关频率/kHz
			k_p	k_i	
10	50	2	4.4	0.5	10
直流侧电压/V	滤波电感/mH	给定并网电流/A	改进遗传 PI 参数		线路电阻/ Ω
			k_p	k_i	
800	8	20	3.9077	0.1315	0.1

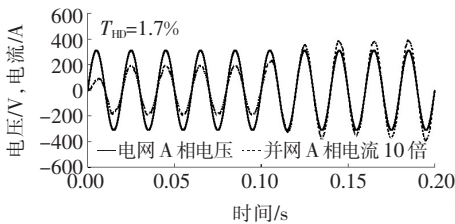
3 种控制策略并网电流波形如图 8 所示,当采用 PI 控制策略时,谐波电流为 4.87%,谐波含量较高;当采用 PI 结合重复控制策略时,谐波电流为 2.0%,说明重复控制在逆变器控制中的有效性;当采用改进遗传 PI 结合重复控制时,谐波电流含量还能减小,为 1.7%。



(a) PI 控制



(b) PI 结合重复控制



(c) 改进遗传 PI 结合重复控制

图 8 3 种控制策略并网电流波形

Figure 8 Inverter currents of three control strategies

不同给定电流的控制参数及性能比较如表 2 所示,说明改进遗传算法对于 PI 参数设置具有普遍性,能有效降低电流谐波和提高稳态精度。

表 2 不同给定电流控制参数值及性能对比

Table 2 The control parameters of diffident currents and comparisons of performance

给定电流/A	PI 参数(k_p/k_i)		谐波百分比/% (PI/重复/该文)	稳态电流/A (PI/重复/该文)
	传统	遗传		
10	4.4/0.5	3.8239/0.1592	4.73/2.1/1.7	9.3/9.7/10.1
20	4.4/0.5	3.9077/0.1315	4.87/2/1.7	19.4/19.7/19.9
30	4.4/0.5	4.6394/0.2092	4.62/1.9/1.3	30.2/30.1/30
40	4.4/0.5	4.9487/0.3833	4.5/2.1/1.1	40.4/39.7/40.1
50	4.4/0.5	4.7292/0.2288	4.5/2/1.4	49.6/49.8/50

4 结语

该文首先构建了 LC 型逆变器模型,然后分析了交流量之间耦合关系,通过坐标变换为直流量进行解耦。由于传统 PI 控制在动态性能方面较有优势,但其积分作用取决于时间常数,导致稳态性能略有不足,结合重复控制,对过去几个采样周期的误差累加,提高稳态性能,同时 PI 控制可以兼顾快速性。最后通过改进遗传算法对 PI 参数进行优化,克服传统 PI 参数设置的难点,进一步提高并网电流的质量。实际工程中,其离线优化好的 PI 参数预先导入芯片内存中,对应于实际运行点,每段区域都有一个最优参数值。通过 Matlab/Simulink 仿真验证了改进遗传 PI 结合重复控制策略的有效性和可行性。

参考文献:

[1] 杨春波,王晶晶,康鹏,等. 基于混合型算法的光伏发电系统低电压穿越控制策略[J]. 中国电力,2020,53(3): 18-27+58.
 YANG Chunbo, WANG Jingjing, KANG Peng, et al. Research on LVVRT control strategy of photovoltaic system based on hybrid control algorithm[J]. Electric Power, 2020, 53(3): 18-27+58.

[2] 任庭昊,代启璇,郝新翔,等. 低压微电网逆变器并联系统控制策略研究[J]. 智慧电力,2019,47(6):34-39+55.
 REN Tinghao, DAI Qican, HAO Xinxiang, et al. Control strategy of low voltage microgrid inverter parallel sys-

- tem[J]. *Smart Power*, 2019, 47(6):34-39+55.
- [3] 荣飞,黄韬,饶宏,等. MMC换流阀最优三次谐波注入方法研究[J]. *高压电器*, 2019, 55(7):20-26.
RONG Fei, HUANG Tao, RAO Hong, et al. Optimal method of third harmonic injection to MMC valve[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(7):20-26.
- [4] 王兰,陈俐. 三相四开关有源电力滤波器的容错控制技术[J]. *电气传动*, 2020, 50(2):55-62.
WANG Lan, CHEN Li. Fault-tolerant control technology of the three-phase four-switch active power filter[J]. *Electric Drive*. 2020, 50(2):55-62.
- [5] 麦志勤,肖飞,刘计龙,等. 基于准比例谐振级联PI的双三相永磁同步电机谐波电流抑制策略[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(24):5751-5759.
MAI Zhiqin, XIAO Fei, LIU Jilong, et al. Harmonic current suppression strategy of dual three-phase permanent magnet synchronous motor based on quasi proportional resonant cascading PI[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(24):5751-5759.
- [6] YE Yongqiang, WU Yuheng, XU Goufeng, et al. Cyclic repetitive control of CVCF PWM DC-AC converters [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(12):9399-9409.
- [7] 杨旭红,王毅舟,王创典,等. 基于重复控制和模糊PI控制的Z源逆变器并网研究[J]. *电机与控制应用*, 2016, 43(5):22-27.
YANG Xuhong, WANG Yizhou, WANG Chuangdian, et al. Research on Z Source inverter grid-connected system based on repetitive control and fuzzy PI control[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2016, 43(5):22-27.
- [8] 游云峰,李媛,方番,等. 级联多电平准Z源逆变器的无差拍并网控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(17):48-53.
YOU Yunfeng, LI Yuan, FANG Fan, et al. Deadbeat grid-connected control strategy of quasi-Z-source cascaded multilevel inverter[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(17):48-53.
- [9] 王赞程,陈新,陈杰,等. 基于谐波线性化的三相LCL型并网逆变器正负序阻抗建模分析[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(21):5890-5898.
WANG Yuncheng, CHEN Xin, CHEN Jie, et al. Analysis of positive-sequence and negative-sequence impedance modeling of three-phase LCL-type grid-connected inverters based on harmonic linearization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(21):5890-5898.
- [10] 王金平,翟飞,姜卫东,等. 一种全范围内中点电压平衡的中点钳位型三电平变换器的扩展非连续脉宽调制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(6):1770-1782.
WANG Jinping, ZHAI Fei, JIANG Weidong, et al. An extended dpwm for neutral point clamped three-level converter with a full range of neutral point voltage balance[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(6):1770-1782.
- [11] 王尉. 基于分数阶重复控制的逆变器控制技术研究[D]. 无锡:江南大学, 2021.
- [12] 段友莲,戴林东,郑连清. 基于算法优化的SVC非线性PI稳压控制方法[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2021, 42(4):128-133.
DUAN Youlian, DAI Lindong, ZHENG Lianqing, et al. Nonlinear PI voltage stabilization control method of SVC based on algorithm optimization[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2021, 42(4):128-133.
- [13] 陈美锋,王久和,夏亮. 一种新型TNPC-UPQC混合无源控制策略[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(1):169-176.
CHEN Meifeng, WANG Jiuhe, XIA Liang. A new TNPC-UPQC hybrid passivity based control strategy [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(1):169-176.
- [14] 崔静思,高凯,韩子娇,等. 基于遗传算法的VSC—HVDC控制系统PI参数优化[J]. *电网与清洁能源*, 2017, 33(2):26-31.
CUI Jingsi, GAO Kai, HAN Zijiao, et al. Control system PI parameter optimization based on genetic algorithm for VSC-HVDC [J]. *Power System and Clean Energy*, 2017, 33(2):26-31.