

基于 PLC 技术的电力系统电压自动调节和控制方法

马红杰

(河北省保定技师学院, 河北 保定 071000)

摘要: 为了满足现代电力系统对电压的稳定性需求, 提出基于可编程逻辑控制器 (programmable logic controller, PLC) 技术的电力系统电压自动调节和控制方法。设计基于 PLC 的电压无功补偿装置, 并根据电压调节和控制策略制定依据, 提出基于九区图的电压调节和控制策略, 将电力系统使用基本九区图进行区域划分后, 采用 PLC 接收电力系统高压侧测量的功率因素与低压侧测量到的母线电压, 将实时母线电压数据和标准电压值输入 PLC 中的模糊比例-积分-微分 (proportional-integral-derivative, PID) 控制器, 输出调节后的电压值, 结合功率因素对电压值的越限区域进行判断后, 发出该区域对应的电容组投切无功补偿指令, 完成电力系统电压控制。实验结果表明, 该方法可通过电压越线情况分区, 给出该区域对应的电容组投切控制策略, 保证电压稳定, 可以在短时间内将电压波动控制在平稳状态。

关键词: PLC; 电力系统; 电压调节; 电压控制; PID; 无功补偿系统

中图分类号: TP273; TM714.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-7241(2025)08-0042-06

Automatic Voltage Regulation and Control Methods for Power Systems Based on PLC Technology

MA Hongjie

(Baoding Technician College, Baoding 071000, China)

Abstract: This paper proposes an automatic voltage regulation and control method for power systems based on programmable logic controller (PLC) technology to meet the voltage stability requirements of modern power systems. It designs a voltage and reactive power compensation device based on PLC, and develops a basis for voltage regulation and control strategies, proposes a voltage regulation and control strategy based on the nine zone diagram. After dividing the power system into regions using the basic nine zone diagram, it uses the PLC controller to receive the power factor measured on the high voltage side of the power system and the bus voltage measured on the low voltage side, inputs real-time bus voltage data and standard voltage values into the fuzzy proportional-integral-derivative (PID) controller in the PLC. After outputting the adjusted voltage value, combined with power factors, the exceeding range of the voltage value is judged, and the corresponding capacitor bank switching reactive power compensation command is issued to complete the voltage control of the power system. The experimental results show that this method can partition the voltage crossing situation and provide the corresponding capacitor bank switching control strategy in this area, ensuring voltage stability and controlling voltage fluctuations in a stable state in a short period of time.

Keywords: programmable logic controller; power system; voltage regulation; voltage control; proportional-integral-derivative; reactive power compensation system

0 引言

随着电力系统和工业自动化的快速发展, 电力系统电压自动调节和控制技术的要求也越来越高。电力系统电压自动调节和控制是保证电力系统稳定运行的关键环节。传统的电压调节和控制方法往往存在调节精度低、响应速度慢等缺点, 难以满足现代电力系统对电压稳定性的要求。

目前就电力系统电压自动调节与控制的研究有很多, 如颜湘武等研究通过 ES 拓扑结构对额定电压进行负

载运行过程中的保护与控制, 提出电压闭环控制策略, 将其应用在 PR 控制器中, 最终实现电压的调节与控制, 但此方法无法对较大的电力系统进行应用, 只适用于小型电力系统^[1]; 孔祥平等研究五电平脉宽调制对电压进行调节与控制, 其通过中点电压的偏移情况进行中点电压控制, 最终实现电压的调节与控制, 但此方法太过简陋, 极易在电压调节控制的过程中出现失误, 导致电力系统短暂失灵^[2]; 王立平等研究通过对电力系统可承受的电压进行确定, 根据最大可承受电压对无功量进行精确计算, 使柔性直流换流阀可以对电压进行无功控制与定量调节, 最终实现电压的调节与控制, 但此方法所适用的情况过

*基金项目: 河北省人力资源和社会保障课题 (JRS-2021-7039)

收稿日期: 2023-12-20

于单一,无法面对太过复杂的电压失衡情况^[3]。

PLC作为一种可编程控制器,具有强大的逻辑控制和数据处理能力,能够实现复杂的控制和调节功能^[4]。在电力系统电压自动调节和控制中,PLC技术可以通过采集电力系统的实时数据,根据预设的控制策略,对电压进行精确的调节和控制,为此提出基于PLC技术的电力系统电压自动调节和控制方法,对电力系统的安全与稳定运行作出贡献。

1 电力系统电压自动调节和控制

本文通过基于PLC的电压无功补偿对电力系统电压进行调节与控制^[5],如图1所示。基于PLC的电压无功补偿装置为模块化结构,可对无功电压通过电力系统负荷状况进行分级自动调节,拥有分级任选与配置灵活的特点。根据图1,PLC控制器用于接收电力系统高压侧测量的功率因素与低压侧测量到的母线电压,并通过这些数据,发出与之相对应的无功补偿投切指令。使用开关柜作为控制电容器组投切的总开关,合理投切电容组完成电力系统电压自动调节与控制^[6]。

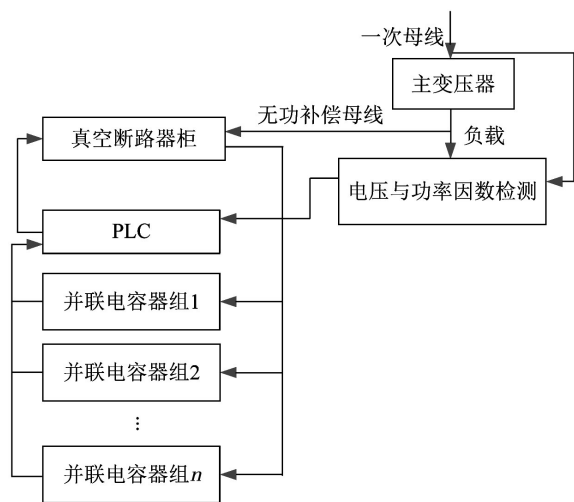


图1 无功补偿装置结构图

1.1 基于无功补偿的电压自动调节和控制策略

1.1.1 电压调节和控制策略制定依据

(1) 设一组电容器的容量为 Q_c , $Q_c = P \tan \varphi$, 电力系统传送的有功功率为 P , 功率因素角为 φ ; 设电力系统传送功率因素为 λ_1 , 当投入一组电容器后, 通过公式(1)与公式(2)的计算, 从而获得投入一组电容器后的功率因素 λ_2 :

$$\tan \varphi_2 = \tan \varphi_1 - \frac{Q_c}{P} \quad (1)$$

$$\lambda_2 = \cos \sqrt{\frac{1}{1 + \tan^2 \varphi_2}} \quad (2)$$

式中, φ_1 、 φ_2 分别为通过投切电容组进行电压控制前后的功率因素角。

根据式(1)、式(2)可以发现, 投切电容可以使功率因素产生变化, 而这种变化与 P 相关。有功功率在电力系统运行时是不断变化的, 并且其变化的范围很大, 因此需要将电压控制效果与电压负荷的关系纳入至判据之中。

(2) 在保证电压合格和无功功率平衡的前提下变电站电压无功调节的原则是, 对电压的调节次数尽量减少, 特别是有载分接开关的调节次数。当电压越限时, 优先考虑通过投切电容器来调整电压, 以降低分接头的调节频率, 遵循这一原则进行操作。

1.1.2 基于九区图的电压调节和控制

本文使用基本九区图对电力系统进行分区电压调节和控制^[7], 基本九区图划分情况如图2所示。其中, λ_h 与 λ_l 分别表达为变电站功率因素的上限值与下限值; V_h 为变电站电压的上限值; V_l 为变电站电压的下限值; V'_h 与 V'_l 是防止电容器做重复动作的电压限值。根据电压和无功功率的不同区间, 决定电容器组的动作, 在0区, 电压和无功功率都在正常范围, 电容器组保持稳定; 在1、2、3区, 电压低于下限, 需切除全部电容器组; 在4区, 电压虽低, 但为防进一步降低, 须禁止切除电容器组; 在5区, 虽电压正常, 但系统无功功率偏低, 需切除电容器组; 在6区, 电压正常, 但系统无功功率偏高, 需投入电容器组; 在7区, 电压超出上限, 为防止越限, 需禁止投入电容器组; 在8、9区, 电压超出上极限, 需逐级切除电容器组, 无论无功功率是否满足条件。PLC控制器利用采集的母线电压结合标准电压值^[8], 使用模糊PID控制器输出调节后的电压值, 当电压值越过了电压的上限或下限区域时^[9], 利用采集的功率因素, 通过式(1)与式(2)来确定投切电容组后功率因素, 将其与各个分区的功率因素限值作比较, 从而判断越线电压在哪一具体区域, 使用对应区域的控制策略进行电压控制。

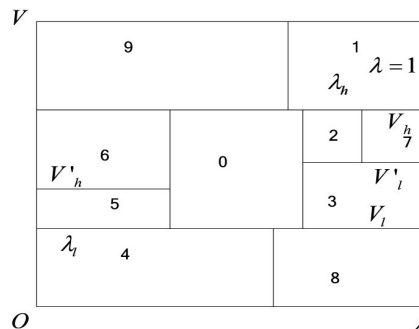


图2 电压控制区域划分图

1.2 基于PLC的模糊PID电压控制器

由于西门子S7-226PLC具有抗干扰能力强、准确性高、体积小等优点, 所以本文PLC控制模块使用西门子S7-226PLC, S7-266PLC有2个RS-485接口, 用于与其他设备连接构成系统和与上位机进行通信。PLC根据母线

电压进行电力系统的电压无功补偿。首先,通过采集的母线电压和标准电压,模糊PID控制器根据实时电压数据和标准电压值,输出调节后的电压值,结合采集的功率因素对电压值的越限区域进行判断,发出该区域对应的电容组投切指令,实现电力系统电压调节和控制。

1.2.1 基于PLC的PID控制器

为了提升电力系统电压调节控制效果,本文在传统的PID控制器基础上增加模糊集合理论,使用模糊集合理论中的模糊逻辑来处理误差信号,以便更好地适应各种控制场景^[10],对PID进行数字化,得到离散PID方程^[11-12],通过此方程对电压控制程序进行设计,基于PLC的PID控制系统如图3所示。

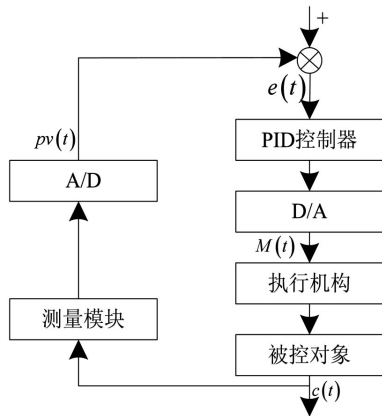


图3 基于PLC的PID控制系统

PID控制器的输入与输出关系为

$$M(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt + \frac{T_d}{dt} \frac{de}{dt} \right] + M_0 \quad (3)$$

式中, $M(t)$ 与 M_0 分别为PID控制器输出的调节电压值与PID控制器输出的初始结果; T_i 与 T_d 分别为积分时间常数与微分时间常数; $e(t)=sp(t)-pv(t)$ 与 K_c 分别为标准电压值 $sp(t)$ 与实时电压值 $pv(t)$ 的误差信号与比例系数, $c(t)$ 为PID控制器的输出。

将 T_s 设为采样周期,当 $t=0$ 为无功补偿系统运行的时刻时,分别使用矩形积分与差分来近似精确积分与微分,将式(3)离散化可得第 n 次采样时PID控制器的输出:

$$M_n = M_{n-1} + K_c [e(n) - e(n-1)] + K_i e(n) + K_d [e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)] \quad (4)$$

式中,第 n 次采样的误差值表达为 e_n ; sp_n 、 pv_n 、 M_n 分别为 $sp(t)$ 、 $pv(t)$ 、 $M(t)$ 的第 n 次采样数字量,微分系数与积分系数分别表达为 K_D 与 K_I 。

1.2.2 模糊PID控制器

为了使无功补偿装置的鲁棒性提高,稳定性更好,在进行电压无功补偿时使用PID控制器的同时添加一个模糊电压控制器^[13],组成模糊PID控制器^[14],如图4所示。

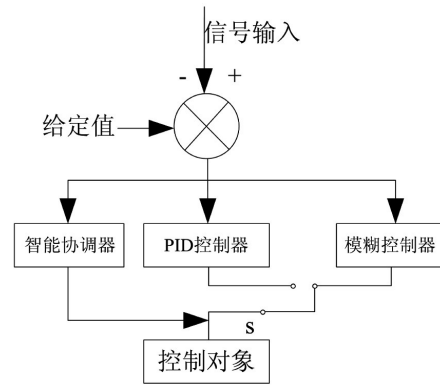


图4 模糊PID控制器的结构图

使无功补偿装置在面对不同情况时通过智能协调器切换模糊控制器与PID控制器,切换条件以无功补偿装置运行时的指标为依据,切换条件如下:

(1) 采用模糊控制器通常在无功补偿装置有节点电压变化大时或无功补偿装置发生超调与振荡等情况。

(2) 除(1)外的情况,均使用PID控制器。模糊控制器通过控制电容和电感支路上的晶闸管,对无功补偿装置的补偿容量进行调整。由于电力系统的电压需全系统无功平衡,模糊控制器的输入采用无功功率 ΔQ 、电压 ΔU ,需补偿容量作为模糊控制器输出变量,计算各支路晶闸管的通断状态,解决改善电压质量和提高功率因数可能有矛盾的问题,从而实现无功调节和电压稳定。

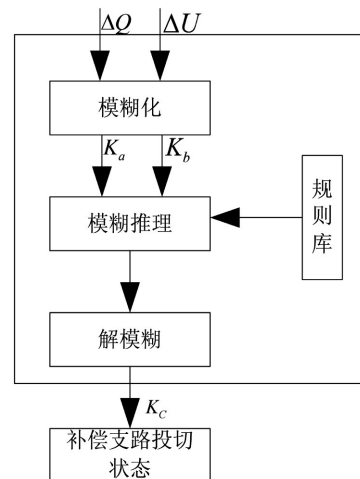


图5 模糊控制器结构图

对输入变量进行模糊化,在装置进行采样时,可得 ΔU 与 ΔQ 的物理量基本论域中的一个精准值,由于控制器的模糊推理与决策都是建立在模糊语言的基础上,输出变量也为模糊数值,因此使用量化因子 K_a 与 K_b 将 ΔU 与 ΔQ 的物理量基本论域中的每个精准值都转化为论域中的模糊值,完成输入变量的模糊化。

输出变量与 K_C 相乘可实现反模糊化,从而得到实际所需的物理量。 ΔU 与 ΔQ 的论域分别为 $\{-2, -1, 0, 1, 2\}$ 与 $\{-6, -3, 0, 3, 6\}$;其模糊子集定义分别为 $\{NB, Z, PB\}$ 与

{NB, NS, Z, PS, PB}; ΔU 使用梯形隶属函数; ΔQ 使用三角形隶属函数。

模糊控制器最为重要的设计核心为模糊控制规则,根据其他控制器对电压控制的规律,使用Mamdani模糊推理算法对模糊控制规则进行模糊推理合成,其中推理合成为极大至极小合成规则,使用重心法进行解模糊,模糊控制规则表如表1所示。

表1 模糊控制规则表

ΔQ	ΔU		
	NB	Z	PB
NB	PB	PS	Z
NS	PS	Z	PS
Z	NS	Z	PS
PS	NS	Z	NS
PB	Z	NS	NB

2 实验结果与分析

将本文方法使用在某电力系统D中,观察本文方法的实际使用情况,电力系统D中拥有8个变电站,电网可覆盖整个省,其中变电站电压分别220 kV、110 kV与35 kV,电力系统的结构主要由电源、电力网和用电设备三部分组成。具体包括以下环节:发电环节由各种类型的发电厂构成,负责生产电能;输电环节由升压变电所、高压输电线路和降压变电所组成,负责将电能从发电厂输送到电能消费者;配电环节由配电所和配电线路组成,负责将电能分配给不同的用户。

实验统计2020年1月份使用本文方法进行该电力系统电压调节与控制的分区情况以及详细的电压无功补偿控制策略,如表2所示。观察表2可以发现,本文方法能够有效地对电压越线情况进行分区,并实施该区域对应的电容组投切控制策略,最终保障电力系统电压稳定。证明了本文方法在电压波动控制方面的有效性。

观察若在相同负荷参数的投入下,无功补偿装置中由PID控制器单独完成电压控制的效果与由加入了模糊控制器的模糊PID控制器完成电压的调节与控制的效果进行对比,验证本文所使用的基于PLC的模糊PID控制器的使用效果,具体如图6所示。观察图6,在无功补偿装置中,突加感性无功负荷的情况下,通过将PID控制和模糊PID控制的表现进行对比,发现模糊PID控制在处理超调问题时效果更佳。当感性无功负荷在1.1 s被切除时,模糊PID控制也展现出优势。同理,在0.3 s左右,模糊PID控制切换至传统PID控制模式,消除静差并提高响应速度,进一步优化系统的动态性能。

表2 电压调节与控制的分区情况及无功补偿策略

时间	分区	对应控制方法	电压控制成功与否
1月1日	1	电压低于下限,须切除全部电容器组	是
1月2日	6	电压正常,但系统无功功率偏高,须投入电容器组	是
1月5日	2	电压低于下限,须切除全部电容器组	是
1月7日	0	电压和无功功率都在正常范围,电容器组保持稳定	是
1月9日	5	虽电压正常,但系统无功功率偏低,须切除电容器组	是
1月10日	4	电压虽低,但为防进一步降低,须禁止切除电容器组	是
1月13日	8	电压超出上极限,须逐级切除电容器组,无论无功功率是否满足条件	是
1月16日	8	电压超出上极限,须逐级切除电容器组,无论无功功率是否满足条件	是
1月17日	0	电压和无功功率都在正常范围,电容器组保持稳定	是
1月19日	7	电压超出上限,为防止越限,须禁止投入电容器组	是
1月21日	9	电压超出上极限,须逐级切除电容器组,无论无功功率是否满足条件	是
1月23日	3	电压低于下限,须切除全部电容器组	是
1月24日	4	电压虽低,但为防进一步降低,须禁止切除电容器组	是
1月27日	0	电压和无功功率都在正常范围,电容器组保持稳定	是
1月30日	2	电压低于下限,须切除全部电容器组	是

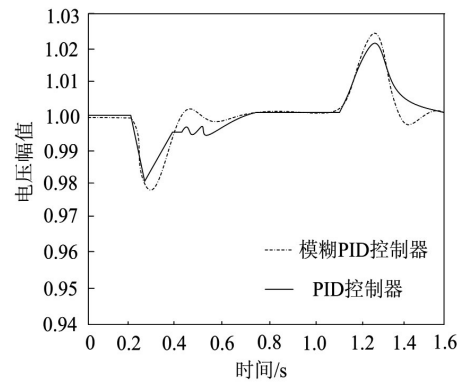


图6 PID与模糊PID控制器的电压控制效果

对使用无功补偿装置对电压调节与控制的时间进行实验与分析,观察其电压调节的速度与效率,为了保证实验的准确性,进行了多次实验,如图7所示。观察图7可以发现,两次实验的电压控制时间均小于0.2 s,本文方法能够快速调节电压,稳定电力系统。实验表明,本文方法在检测到电压波动后,能在极短时间内做出响应,有效调节电压。这种快速响应能力使得电压波动得到及时补偿,防止了电压长时间偏离额定值,为电力系统的稳定运行提供了保障,使电力系统更加安全。

对比分析PID控制器与模糊PID控制器的对无功补偿装置使用情况的影响,表3为PID控制器与模糊PID控制器在2020年对电压进行调节与控制并成功的次数。观

察表3可以发现模糊PID控制器对电压调节控制的次数较比PID对电压调节控制的次数要多,说明模糊PID控制器对电压的浮动变化更为敏感,可以更加快速地对电压的浮动作出反应;模糊PID电压调节控制的成功次数也较比PID要更多,出现失误的次数更少,说明模糊PID较比PID的准确性更高。

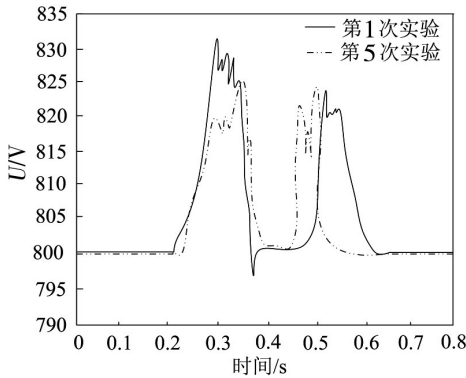
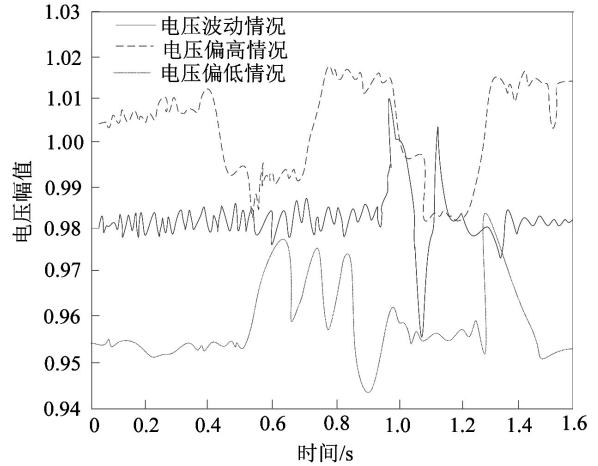


图7 无功补偿系统调节电压图

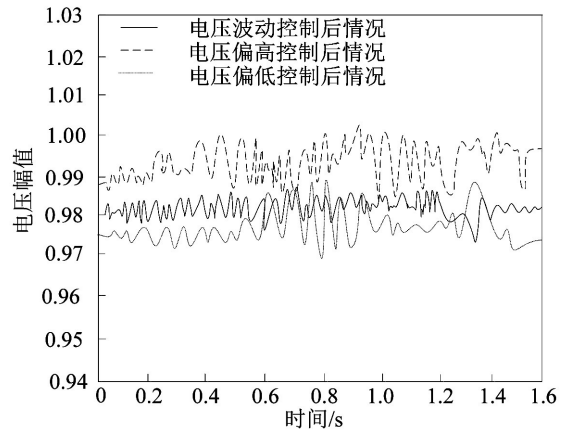
表3 PID与模糊PID电压调节与控制成功次数

时间	电压调节控制次数		电压调节成功次数	
	PID	模糊PID	PID	模糊PID
2020年1月份	10	11	9	11
2020年2月份	18	19	18	19
2020年3月份	15	16	14	16
2020年4月份	15	16	15	15
2020年5月份	14	15	14	15
2020年6月份	16	17	15	17
2020年7月份	14	15	14	15
2020年8月份	15	16	15	15
2020年9月份	16	17	15	17
2020年10月份	18	19	16	19
2020年11月份	16	17	16	17
2020年12月份	15	16	14	16

实验分析本文方法在不同电力波动与故障时进行的电压调节与控制效果,如图8所示。根据图8发现,在电压偏高的情况下,电力系统的电压超过了设备的额定电压,可能导致设备损坏和电能质量下降。采用本文方法进行调节控制后,可以通过减少无功功率的输出,降低系统中的电压水平,从而保护设备和提高电能质量。电压偏低是指电力系统的电压低于设备的额定电压,可能导致设备无法正常运行,影响电力系统的稳定性和电能质量。在这种情况下,本文方法可以通过增加无功功率的输出,提高系统中的电压水平,保证设备的正常运行和电能质量。电压波动是指电力系统中的电压在一定范围内波动,可能对电气设备和电能质量产生不良影响。采用本文方法进行调节控制后,可以根据系统的实时状态进行智能调节,平滑电压波动,提高电力系统的稳定性和电能质量。



(a) 3种失调的电压情况



(b) 3种电压失调情况调节控制后

图8 3种电压失调情况调节控制前后效果图

3 结束语

本文为电力系统的稳定运行提供了一种高效、可靠、灵活的解决方案。PLC控制器能够精确地控制无功补偿装置等电压调节设备,对电压波动进行及时的补偿和调节。通过实验分析和实际应用,该方法表现出了良好的调节性能和控制效果,为提高电力系统的电压稳定性和供电质量提供了有力的支持,随着电力系统和工业自动化的不断发展,该方法将会得到更加广泛的应用和推广,为保障电力供应和促进工业发展作出更大的贡献。

参考文献:

[1] 颜湘武, 贾焦心, 王德胜, 等. 基于电力弹簧的低压台区用户侧电压调节方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(12): 2623-2631.
 [2] 孔祥平, 张弛, 丁明敏, 等. 三电平LLC谐振变换器中点电压平衡控制方法[J]. 电力电子技术, 2023, 57(5): 126-129.
 [3] 王立平, 叶超. 基于柔直换流阀的交流电压定量调节方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(6): 44-49.
 [4] 卞智逸, 肖德琴, 殷建军, 等. 基于PLC技术的火龙果智能补光调器设计与应用[J]. 华南农业大学学报, 2022, 43(5): 124-132.

(下转第51页)