

基于光伏逆变器功率控制的电网无功电压调节方法

张礼波¹, 张峻诚², 李昌文², 张裕³, 陈巨龙³, 林琳²

(1. 贵州电网有限责任公司六盘水供电局, 贵州 六盘水 553000;

2. 东方电子股份有限公司, 山东 烟台 264000;

3. 贵州电网有限责任公司电网规划研究中心, 贵州 贵阳 550000)

摘要: 为避免光伏并网后发生电压越限情况, 保证电压运行稳定, 提出一种基于光伏逆变器功率控制的电网无功电压调节方法。该方法分析光伏并网对于电压的影响, 以此为依据, 采用线性计算方法通过3个控制阶段, 控制光伏逆变器的功率, 获取逆变器有功和无功两种功率的控制调整量; 依据该控制量确定电网无功电压调节的目标函数和约束条件, 并利用改进的混沌遗传算法, 求解目标函数, 输出无功电压调节结果。测试结果表明, 该方法具有可行性, 可完成本地电压控制; 可有效完成逆变器功率控制, 通过功率控制调整量, 完成电压控制; 可使电压波动率均低于1.25%, 有效避免节点发生电压越限情况; 并可显著降低配电网中各个节点的网损结果, 使其均在5.9 kW/h以下。

关键词: 光伏逆变器; 功率控制; 无功电压调节; 控制调整量; 网损结果; 电压波动率

中图分类号: TP273; TM615 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)08-0047-05

Reactive Voltage Regulation Method for Power Grid Based on Photovoltaic Inverter Power Control

ZHANG Libo¹, ZHANG Juncheng², LI Changwen², ZHANG Yu³, CHEN Julong³, LIN Lin²

(1. Liupanshui Power Supply Bureau of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Liupanshui 553000, China;

2. Dongfang Electronics Co., Ltd., Yantai 264000, China;

3. Power Grid Planning and Research Center of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550000, China)

Abstract: To avoid voltage exceeding the limit after photovoltaic grid connection and ensure voltage operation stability, a reactive voltage regulation method for power grid based on photovoltaic inverter power control is proposed. This method analyzes the impact of photovoltaic grid connection on voltage, and based on this, uses a linear calculation method to control the power of the photovoltaic inverter through three control stages, obtaining control adjustments for the active and reactive power of the inverter. Based on this control quantity, it determines the objective function and constraint conditions for reactive voltage regulation, and uses an improved chaotic genetic algorithm to solve the objective function and outputs the result of reactive voltage regulation. The test results show that this method is feasible and can complete local voltage control, effectively completing inverter power control, adjusting the amount of power control to achieve voltage control. Ensure that the voltage fluctuation rate is below 1.25%, effectively avoiding voltage exceeding limits at nodes. And it can significantly reduce the network loss results of each node in the distribution network, making them all below 5.9 kW/h.

Keywords: photovoltaic inverter; power control; reactive voltage regulation; control the adjustment amount; network loss results; voltage fluctuation rate

0 引言

光伏的大量并网, 对电网内的潮流分布造成直接影响, 会导致并网位置的电压升高, 并且随着光伏的渗透率不断增加^[1], 电压的升高幅度会随之继续增加, 引起电网线路节点电压超限以及电抗原件的电压波动, 形成无功电压, 会降低电网的运行安全性和稳定性^[2]。因此, 为保

证光伏并网后电网的稳定安全运行, 需采用便捷、有效的措施进行无功电压控制^[3]。目前无功电压控制的过程中, 对于复杂运行工况下的控制效果较差^[4], 例如光伏并网节点数量较多或者线路阻抗发生变化后, 则无功电压的控制效果较差。

文献[5]为实现无功电压的有效控制, 针对光伏的负荷波动变化进行分析后, 通过深度确定性策略梯度算法进行电网无功优化, 实现无功调节; 但是该方法在应用过程中, 当光伏功率状态发生变化后, 其优化效果不理想。

*基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目(GZKJXM20220035)

收稿日期: 2023-12-01

文献[6]为实现无功电压的调节,依据各个节点之间的耦合程度,采用深度学习和聚类方法对无功区域进行分区,针对不同分区情况采取针对性控制策略;但是该方法在应用过程中,如果光伏并网点数量较多,节点潮流波动较大,该方法的控制效果较差。

光伏逆变器是光伏并网时实现直流电压的转换的一种装置,其可将电压转换成交流电;并且逆变器是保证光伏阵列运行平衡的重要部分^[7],可在孤岛效应下保证光伏的平衡运行。因此,本文基于光伏逆变器的功能,并分析光伏并网后对于电压影响程度,提出基于光伏逆变器功率控制的电网无功电压调节方法。

1 电网无功电压调节

1.1 光伏并网的电压越限分析

光伏并网后,主要是采用单位功率因数下最大跟踪模式运行,因此会导致电压升高,发生显著的电压越限情况,对于电网的运行安全性和稳定性造成直接影响^[8]。因此,为保证电网无功电压的有效调节,本文对光伏并网后对电压的影响进行分析。

如果电网中存在的负载节点数量为 n ,在第 k 个节点处并入光伏电源,电源接入点 k 的电压用 U_k 表示,该电源的有功和无功两种功率分别用 $P_{DG,k}$ 和 $Q_{DG,k}$ 表示;电网母线节点用 o 表示,主电路内阻抗用 R_o 和 X_o 表示,第 i 段线路的等值电阻和电抗用 R_i 和 X_i 表示,负载功率用 $P_{L,i}+jQ_{L,i}$ 表示。光伏并网后,电源接入点 k 发生的压损失用 ΔU_k 表示, ΔU_k 计算公式为

$$\Delta U_k = \frac{P_{DG,k} \sum_{j=0}^k R_j + Q_{DG,k} \sum_{j=0}^k X_j}{U_N^2} \times 100\% \quad (1)$$

式中, R_j 和 X_j 表示第 j 段线路的等值电阻和电抗; U_N 表示本地电压。

U_N 对 $P_{DG,k}$ 和 $Q_{DG,k}$ 引起的电压上升率分别用 $\mu_{P,k}$ 和 $\mu_{Q,k}$ 表示,两者的计算公式为

$$\mu_{P,k} = \frac{\partial(0 - \Delta U_k \%)}{\partial P_{DG,k}} \quad (2)$$

$$\mu_{Q,k} = \frac{\partial(0 - \Delta U_k \%)}{\partial Q_{DG,k}} \quad (3)$$

式中, $\Delta U_k \%$ 表示电压损失百分比。

依据上述公式可知,光伏并网后在运行过程中,光伏逆变器的功率情况和本地电压存在直接关联,会影响电压的升高,发生电压越限。

1.2 光伏逆变器功率控制

基于1.1小节的分析结果可知,对光伏逆变器的功率

进行控制,可实现电压的越限情况的有效处理,保证电网无功电压的稳定性^[9-10]。因此,本文需先实现逆变器功率控制,获取逆变器功率的控制调整量;在该过程中,文中充分考虑光伏多处并网情况,即多个逆变器功率控制,同时结合不同电压控制阶段,本文采用线性计算方法,获取逆变器有功和无功两种功率的控制调整量,为无功电压控制提供依据。

1.2.1 光伏逆变器无功功率补偿阶段

如果光伏电站为正常运行,则逆变器处于最大功率因数点运行状态,此时,光伏电源接入处的电压 U_k 需满足式(4):

$$U_o = U_k + \frac{\sum_{i=0}^k \left[\left(\sum_{j=i}^n P_j \right) R_i + \left(\sum_{j=i}^n Q_j \right) X_i \right] - P_{DG,k} R_k}{U_k} \quad (4)$$

式中, U_o 表示电网母线电压; P_j 、 Q_j 表示补偿阶段中光伏逆变器的有功和无功功率; R_k 表示 k 处的电阻。

在该阶段中,可对光伏逆变器输出的 $Q_{DG,k}$ 结果对光伏电源接入处的电压进行调整,使其接近目标电压 $U_{k,lim}$,此时 $U_{k,lim}$ 需满足式(5):

$$U_o = U_{k,lim} + \frac{\sum_{i=0}^k \left[\left(\sum_{j=i}^n P_j \right) R_i + \left(\sum_{j=i}^n Q_j \right) X_i \right] - P_{DG,k} R_k + Q_{PV,b} X_k}{U_{k,lim}} \quad (5)$$

式中, $Q_{PV,b}$ 表示感性无功功率,由光伏逆变器输出,且该功率发生在 U_k 下降至 $U_{k,lim}$ 的情况下; k 处的电抗用 X_k 表示。

结合上述两个公式得出:

$$\begin{cases} Q_{PV,b} = \frac{A}{X_k} \\ A = U_o (U_k - U_{k,lim}) + U_{k,lim}^2 - U_k^2 \end{cases} \quad (6)$$

如果光伏逆变器功率 S 达到最大值 S_{max} , k 处的电压依旧越限,则进入以下控制阶段。

1.2.2 光伏逆变器最大功率调整阶段

在逆变器处于容量最大情况时,其功率因数角用 θ_{lim} 表示,此时 U_k 需满足式(7):

$$U_o = U_k + \frac{\sum_{i=0}^k \left[\left(\sum_{j=i}^n P_{PV,j} \right) R_i + \left(\sum_{j=i}^n Q_{PV,j} \right) X_i \right]}{U_k} \quad (7)$$

$$\frac{S_{max} (R_k \cos \theta_{lim} + X_k \sin \theta_{lim})}{U_k}$$

式中, $P_{PV,i}$ 和 $Q_{PV,i}$ 分别表示第 i 个光伏电源可输出的有功和无功两种功率;在该阶段中,逆变器始终保持 S_{max} ,通过功率因数进行调整后,满足 $U_{k,lim}$ 的标准即为 k 处的电压调整目标,此时需满足式(8):

$$U_o = U_{k,\text{lim}} + \frac{\sum_{i=0}^k \left[\left(\sum_{j=i}^n P_{\text{PV},j} \right) R_i + \left(\sum_{j=i}^n Q_{\text{PV},j} \right) X_i \right]}{U_{k,\text{lim}}} - \frac{\left(R_k P_{\text{PV},t} + X_k \sqrt{S_{\text{max}}^2 - P_{\text{PV},t}^2} \right)}{U_{k,\text{lim}}} \quad (8)$$

结合式(7)和式(8)可获取该阶段调整后逆变器在 t 时刻输出的有功功率 $P_{\text{PV},t}$, 其计算公式为

$$P_{\text{PV},t} = \frac{(A+B)R_k + CX_k}{R_k^2 + X_k^2} \quad (9)$$

$$\begin{cases} B = S_{\text{max}} (R_k \cos \theta_{\text{lim}} + X_k \sin \theta_{\text{lim}}) \\ C = \left[(S_{\text{max}} R_k)^2 + (S_{\text{max}} X_k)^2 - (A+B)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (10)$$

1.2.3 光伏逆变器功率削减阶段

如果通过上述两个阶段调整后, k 处的电压仍旧存在越限情况, 则进行光伏逆变器有功功率削减处理。

θ_{lim} 的最大值为 θ_{max} , 如果光伏逆变器处于该情况下, U_k 需满足式(11):

$$U_o = U_k + \frac{\sum_{i=0}^k \left[\left(\sum_{j=i}^n P_{\text{PV},j} \right) R_i + \left(\sum_{j=i}^n Q_{\text{PV},j} \right) X_i \right]}{U_k} - \frac{S_{\text{max}} \cos \theta_{\text{max}} (R_k + X_k \tan \theta_{\text{max}})}{U_k} \quad (11)$$

在该阶段中, 逆变器始终保持 θ_{max} , 通过有功功率削减后, 调整 k 处电压, 使其满足 $U_{k,\text{lim}}$ 的标准, 其公式为

$$U_o = U_{k,\text{lim}} + \frac{\sum_{i=0}^k \left[\left(\sum_{j=i}^n P_{\text{PV},j} \right) R_i + \left(\sum_{j=i}^n Q_{\text{PV},j} \right) X_i \right]}{U_{k,\text{lim}}} - \frac{P_{\text{PV},s} (R_k + X_k \tan \theta_{\text{max}})}{U_{k,\text{lim}}} \quad (12)$$

结合上述两个公式得出该阶段处理后, 光伏逆变器的有功功率 $P_{\text{PV},s}$:

$$P_{\text{PV},s} = S_{\text{max}} \cos \theta_{\text{max}} + \frac{A}{R_k + X_k \tan \theta_{\text{max}}} \quad (13)$$

1.2.4 逆变器功率的控制调整量计算

结合上述3个阶段的控制结果, 完成逆变器功率的控制调整量计算, 其计算公式为

$$\Delta P_{\text{PV},s} = \frac{(U_{k,\text{lim}} - U_{k,s})(P_{\text{PV},t} - \cos \theta_{\text{min}})}{U_{k,t} - U_{k,l}} \quad (14)$$

$$\Delta Q_{\text{PV},s} = \frac{Q_{\text{PV},s}(U_{k,\text{lim}} - U_{k,s})}{U_{k,s} - U_{k,m}} \quad (15)$$

式中: $\Delta P_{\text{PV},s}$ 和 $\Delta Q_{\text{PV},s}$ 表示逆变器有功和无功两种功率的控制调整量; $U_{k,s}$ 表示满足式(13)时 k 处的接入电压; $U_{k,m}$ 和 $U_{k,l}$ 分别表示光伏逆变器在满足 θ_{lim} 和 θ_{max} 情况下, k 处的接入电压。

1.3 电网无功电压调节实现

依据上述内容获取光伏逆变器的 $\Delta P_{\text{PV},s}$ 和 $\Delta Q_{\text{PV},s}$ 结果后, 进行电网无功电压调节, 确定调节的目标函数。文中确定的目标函数为所有光伏逆变器的 $\Delta Q_{\text{PV},s}$ 总和, 同时充分结合无功调节无法满足电网无功电压保持在限制范围内的情况^[11], 则降低 $\Delta P_{\text{PV},s}$ 结果。因此, 为保证光伏逆变器输出的无功功率总和最小, 在无需进行功率削减时, $\Delta P_{\text{PV},s}$ 的结果等于 0, 需要进行功率削减时, 需保证 $\Delta P_{\text{PV},s}$ 的结果最小。基于此确定电网无功功率调节的目标函数:

$$\min \sum_{i=1}^N (\Delta Q_{\text{PV},s} + \omega \Delta P_{\text{PV},s}) \quad (16)$$

约束条件设定:

(1) 光伏逆变器容量约束为

$$(P_{\text{PV},i} - \Delta P_{\text{PV},s})^2 + (Q_{\text{PV},i})^2 \leq S_i \quad (17)$$

式中, S_i 表示光伏逆变器额定容量。

(2) 光伏电源有功功率约束为

$$0 \leq \Delta P_{\text{PV},s} \leq P_{\text{PV},i} \leq P_{\text{max},i} \quad (18)$$

(3) 节点潮流约束:

$$\begin{cases} P_{i,c} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_{i,c} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (19)$$

式中, $P_{i,c}$ 、 $Q_{i,c}$ 分别表示电网节点的有功和无功两种功率; 该节点的电压用 U_i 表示; 节点 j 的电压用 U_j 表示; 支路 ij 的线路参数用 G_{ij} 和 B_{ij} 表示, 该支路的相角用 δ_{ij} 表示。

(4) 节点电压约束为

$$U_{\text{min}} \leq |U_i| \leq U_{\text{max}} \quad (20)$$

通过上述内容完成电网无功电压调节目标函数和约束条件的确定后, 文中采用改进的混沌遗传算法, 进行目标函数求解, 在满足约束条件的情况下, 获取最小的 $\Delta P_{\text{PV},s}$ 和 $\Delta Q_{\text{PV},s}$, 实现电网无功电压的调节。

2 实验结果分析

为验证本文方法对于电网无功电压的调节效果, 本文以某地区的 220 V 的光伏并网配电网作为实例对象, 该配电网中光伏接入数量为 3 个, 有功功率为 2.48 MW, 接入的逆变器最大功率为 2.5 MVA; 节点数量 29 个, 线路类型为架空线, 相邻节点的距离为 65 m, 其结构如图 1 所示。

实验对象相关参数如表 1 所示。该光伏并网配电网在实际运行过程中, 存在明显的电压越限情况, 导致电网网损较大, 各个节点网损结果均在 15.5 kW/h 以上, 并且光伏的有效利用程度较低。

为验证本文方法的应用可行性, 采用本文方法分析光伏并网后对电压的影响, 获取电网在正常负荷、轻载负

荷运行以及重载负荷 3 种运行模式下,光伏并网后电网的电压变化结果,如表 2 所示。

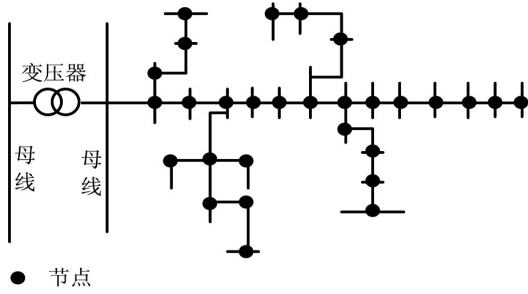


图1 光伏并网配电网结构

表1 光伏并网配电网相关参数详情

参数名称	数值
给定电压幅值上限/p.u	1.01
逆变器最低功率因数	0.98
线路等效电阻/ Ω	75
线路等效电感/mH	12.5
有功输出/kW	10

表2 光伏并网后电网的电压变化结果

运行时间/s	正常负荷	轻载负荷	重载负荷
1	1.03	1.05	1.11
2	1.02	1.03	1.28
3	1.04	1.25	1.26
4	1.03	1.04	1.33
5	1.03	1.16	1.14
6	1.04	1.13	1.06
7	1.02	1.21	1.22
8	1.01	1.44	1.19
9	1.05	1.13	1.48
10	1.03	1.59	1.63

对表 2 的测试结果进行分析后得出:光伏并网后,在正常负荷、轻载负荷运行以及重载负荷 3 种运行模式下,随着运行时间的逐渐增加,电网电压发生不同程度的波动,产生不同幅度的电压越限情况;其中,电压越限最大值达到 1.063 p.u。因此,本文结合光伏接入后的电压的变化情况进行电网电压的控制,具有较好的合理性以及可行性,可为无功电压调节提供可靠依据。

为验证本文方法的应用性能,获取本文方法在不同的负荷程度下,对逆变器功率进行控制后,本地电压的变化结果,并将该结果与控制前本地电压进行对比,测试结果如图 2 所示。

对图 2 的测试结果进行分析后得出:随着负荷比例的逐渐增加,本文方法控制前,电压存在明显的越限情况,波动幅度较大;采用本文方法对逆变器功率进行控制后,本地电压结果平稳程度较好,均在 220 V 左右,没有发生显著的电压越限情况。因此,本文方法具有较好的应用效果,能够最大程度保证电网电压的稳定。

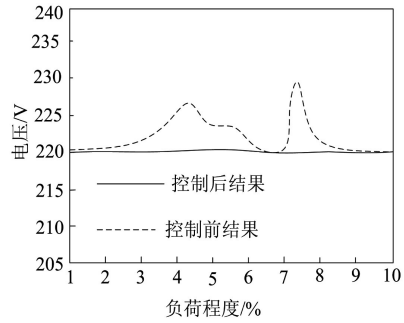


图2 本地电压变化结果

为验证本文方法的应用效果,获取本文方法在进行光伏逆变器功率控制时,在 3 个控制阶段中,随着无功功率的增加,光伏接入点电压和逆变器功率的控制效果,并将该结果和无控制结果进行对照,测试结果如表 3 所示。

表3 光伏接入点电压和逆变器功率的控制效果

控制阶段	电压幅值/p.u	逆变器功率结果/MVA
无控制	1.076	2.48
光伏逆变器无功功率补偿阶段	1.059	2.51
光伏逆变器最大功率调整阶段	1.057	2.51
光伏逆变器功率削减阶段	1.012	2.42

对表 3 的测试结果进行分析后得出:本文方法具有较好的应用效果,在无控制情况下,电压幅值发生显著越限,此时逆变器的功率结果接近其最大功率;通过本文方法进行 3 个阶段控制后,电压幅值发生逐渐下降,当处于第 3 控制阶段时,电压幅值已经下降至 1.02 p.u,极大程度接近给定的电压幅值上限;此时逆变器功率结果为 2.42 MVA。因此,本文方法能够通过控制逆变器功率,实现电压调节,保证电压稳定性。

为进一步验证本文方法对于电网无功电压的调节效果,获取光伏电源不同波动幅度下,该配电网发生电压越限的节点数量依据电压波动率结果,如图 3 所示。

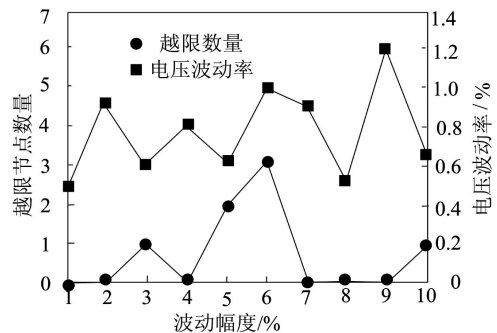


图3 电网无功电压的调节效果测试结果

对图 3 的测试结果进行分析后得出:随着光伏电源波动幅度的逐渐增加,采用本文方法进行调节后,发生电压越限的节点数量均在 3 个以下,电压波动率均低于 1.25%。因此,本文方法具有较好的电压调节效果,可有效避免节点发生电压越限情况,并降低电压波动率,保证电压平

稳,以此保证光伏并网后配电网的稳定运行。

为验证本文方法的应用性,在不同程度电压越限情况下,采用本文方法进行调节,获取调节后配电网中各个节点的网损情况,由于篇幅有限,结果仅随机呈现10个节点的网损结果,如图4所示。

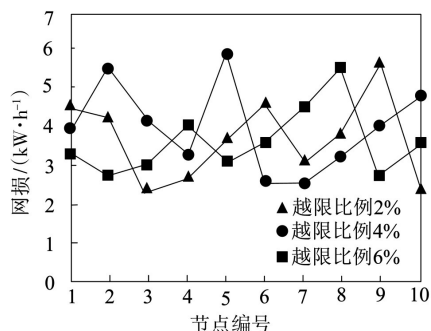


图4 各个节点的网损结果

对图4的测试结果进行分析后得出:当电压发生不同程度的越限后,采用本文方法对其进行调节后,配电网中各个节点的网损结果显著降低,均在5.9 kW/h以下,该结果显著低于调节前各个节点的网损结果,应用性较好。

3 结束语

为实现光伏接入后电网无功电压调节,保证电网稳定运行,本文提出基于光伏逆变器功率控制的电网无功电压调节方法,该方法充分分析光伏接入后,电网的电压变化情况;并在此基础上实现逆变器功率控制,以此获取逆变器功率的控制调整量,依据该调控量实现电网无功电压的有效控制,并且经过测试分析后,证实该方法具有较好的应用效果,能够满足电网无功电压的调节需求。

参考文献:

[1] 李德鑫,王佳蕊,张家郡,等.基于自适应模型预测算法的

光伏并网逆变器无功电压控制策略研究[J].可再生能源,2021,39(8):1087-1093.

[2] 高波,彭程,路文梅,等.基于改进粒子群算法的电网系统无功电压控制[J].计算机仿真,2022,39(9):86-90.

[3] 赵平,赵期期,艾小猛.考虑极限场景的主动配电网重构与无功电压调整联合鲁棒优化[J].电工技术学报,2021,36(增刊2):496-506.

[4] 张继红,宋广宇,熊伟,等.基于虚拟复阻抗的增强型鲁棒电压下垂控制方法及环流抑制策略[J].太阳能学报,2021,42(12):401-409.

[5] 邓清唐,胡丹尔,蔡田田,等.基于多智能体深度强化学习的配电网无功优化策略[J].电工电能新技术,2022,41(2):10-20.

[6] 赵晶晶,贾然,陈凌汉,等.基于深度学习和改进K-means聚类算法的电网无功电压快速分区研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(14):89-95.

[7] 李培帅,吴在军,张错,等.主动配电网分布式混合时间尺度无功/电压控制[J].电力系统自动化,2021,45(16):160-168.

[8] 赵平,赵期期,艾小猛.考虑极限场景的主动配电网重构与无功电压调整联合鲁棒优化[J].电工技术学报,2021,36(S2):496-506.

[9] 钟敏,张驰俊,陈颖聪,等.基于换相阈值精准计算的三电平逆变器故障行为挖掘[J].自动化技术与应用,2024,43(10):31-34.

[10] 彭星,姜飞,涂春鸣,等.不对称故障下光伏逆变器的最优电压支撑策略[J].电网技术,2021,45(11):4259-4268.

[11] 鲍鹏飞,胡屹,郭东东,等.基于轮询电表带电状态的配电网节点电压监控技术研究[J].微型电脑应用,2021,37(12):184-186.

作者简介:张礼波(1986—),男,本科,高级工程师,研究方向:继电保护及自动化。

(上接第46页)

[5] 杨国,陈洁,朱亮亮,等.混合无功补偿系统模型预测直接功率控制策略[J].电力电容器与无功补偿,2022,43(1):30-36.

[6] 宋向征,郭春林,杨洪旺,等.220 kV变电站投切并联电容器组精准合闸策略[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(1):6-11.

[7] 付媛,吴奇,孙星,等.直流微电网中的虚拟储能与分区运行控制技术[J].太阳能学报,2020,41(5):319-328.

[8] 周桔红,刘建委,殷杰,等.地铁交流供电系统无功平衡策略研究——以广州地铁18号线为例[J].都市轨道交通,2023,36(3):160-167.

[9] 李娜,王璐,齐尚敏,等.基于用电信息采集系统的台区无功补偿方案评估[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(6):15-20.

[10] 李冬.基于PID模糊控制器的闭式泵控系统特性研究与分析[J].机床与液压,2020,48(11):111-114.

[11] 陈宝,周祖鹏,卫欢,等.基于专家PID的带臂四旋翼无

人机控制方法[J].计算机应用,2022,42(8):2637-2642.

[12] 李世宏,庞爱平,王勇.高指向精度柔性航天器的 H_∞ PID控制设计[J].自动化技术与应用,2023,42(6):1-4,130.

[13] 李大伟,梁得亮,高亚晨,等.一种基于模糊控制的混合式配电变压器的控制策略[J].电工技术学报,2021,36(增刊2):696-703,722.

[14] 王建刚,杨洪涛,于晓周,等.大型气候环境试验舱冷热端温度动态模糊PID协调控制[J].光学精密工程,2022,30(24):3159-3167.

作者简介:马红杰(1981—),女,本科,高级讲师,研究方向:电气工程自动化教学。