引用格式:王海云,陈茜,张琳钰,等.基于电压分区权重自适应的光伏逆变器和磁控电抗器的配电网无功电压协调控制[J].电力科学与技术学报,2025,40(6):136-146.

Citation: WANG Haiyun, CHEN Qian, ZHANG Linyu, et al. Coordinated reactive voltage control of distribution network with photovoltaic inverter and magnetically controlled reactor based on adaptive voltage partition weights[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(6):136-146.

基于电压分区权重自适应的光伏逆变器和磁控电抗器的配电网无功电压协调控制

王海云[1],陈　茜[1],张琳钰[2],印希宇[2],张志坚[1],魏华跃[1],陈小月[2]

(1.国网北京市电力公司,北京 100031;2.武汉大学电气与自动化学院,湖北 武汉 430072)

摘　要:为发挥无功设备与光伏逆变器的无功调控与调控电压的能力,提升系统运行效率,提高安全稳定性,提出一种基于电压分区权重的自适应的光伏逆变器和磁控电抗器配电网无功电压协调控制方法。先检测并网点电压区间,自适应得到权重计算综合策略下的无功功率,对光伏逆变器进行控制;再建立以电压偏差与有功网损为目标的优化模型,并基于改进量子粒子群算法,对含磁控电抗器与逆变器的配电网进行无功优化;最后,对改进IEEE 33节点系统进行仿真分析。仿真分析结果表明,当有功出力为2 MW时,所提策略使得网络平均电压偏差降低4.28%;在逆变器与磁控电抗器协调无功优化过程中,利用改进量子粒子群算法,使网损最大减少2 663.186 kW,光伏所在节点(10、15、24、30)的平均电压偏差分别降低1.63%、2.32%、0.38%、0.49%。研究结果表明,所提方法能有效提升电网稳定性与经济特性。

关　键　词:逆变器无功调节;磁控电抗器;电压分区;无功优化;改进量子粒子群算法

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.06.013　　**中图分类号**:TM761　　**文章编号**:1673-9140(2025)06-0136-11

Coordinated reactive voltage control of distribution network with photovoltaic inverter and magnetically controlled reactor based on adaptive voltage partition weights

WANG Haiyun[1], CHEN Qian[1], ZHANG Linyu[2], YIN Xiyu[2],
ZHANG Zhijian[1], WEI Huayue[1], CHEN Xiaoyue[2]

(1. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To utilize the reactive power regulation and voltage control capabilities of reactive power devices and photovoltaic inverters and improve system operation efficiency and safety stability, a coordinated reactive voltage control of the distribution network with photovoltaic inverter and magnetically controlled reactor based on adaptive voltage partition weights is proposed. By detecting the grid-connected point voltage range, the reactive power under the weight calculation integrated strategy is adaptively obtained, and the photovoltaic inverter is controlled. Meanwhile, an optimization model with voltage deviation and active transmission loss as objectives is established to optimize the reactive power of the distribution network containing magnetically controlled reactors and inverters based on the improved quantum particle swarm algorithm. Simulation analysis results of the improved IEEE 33 node system show that the proposed strategy results in a 4.28% reduction in the average grid voltage deviation when the active output is 2 MW. During the coordinated reactive power optimization of the inverter and magnetically controlled reactor, the maximum transmission loss is reduced by 2 663.186 kW using the improved quantum particle swarm algorithm, and the average voltage deviation at the nodes where the photovoltaic is located (10, 15, 24, and 30) is reduced by 1.63%, 2.32%,

收稿日期:2025-01-02;**修回日期**:2025-06-04

基金项目:国网北京市电力公司科技项目(52022323000W)

通信作者:陈小月(1987—),女,博士,副教授,主要从事电力系统电磁暂态仿真及过电压防护等方面的研究;E-mail:chenxiaoyue@whu.edu.cn

0.38%, and 0.49%, respectively. The results show that the proposed method in this paper can effectively improve the grid stability and economic performance.

Key words: reactive power regulation of inverter; magnetically controlled reactor; voltage partition; reactive power optimization; improved quantum particle swarm algorithm

在新型电力系统背景下，分布式光伏灵活接入电力系统，极大地降低了电能的远途运输成本，且其具有建设投资小、周期短、选址自由等优势，这些都使得分布式光伏发电装机容量逐年持续增长[1-3]。随着接入系统的分布式光伏规模日渐增大，系统的多源供电问题愈发显著[4-6]。分布式光伏与负荷的实时波动性使分布式光伏接入点极易产生电压越限问题。而电压是衡量电网电能质量的重要因素[7-8]，电网应采取强有力措施以减缓电压波动并预防电压越限的发生。传统的电网电压调节方法有发电机调压、变压器调压、无功补偿设备调压等[9-10]。作为一种新型电源，分布式光伏的电力电子桥式结构具有主动无功电压调节能力。因此，充分利用光伏逆变器的无功性能，提出合适的逆变器控制策略，使其与电网无功设备间进行协调运行，对电网电压主动控制与优化分布具有重要的实际意义。

在光伏逆变器的无功电压控制方面，文献[11]定义了电压降落的电压调节系数，通过该系数与电流计算电压参考值对逆变器无功出力进行控制，但其电压调节能力受电流范围的限制，当电压越限严重时，其无法将电压抬升至正常水平；文献[12]针对光伏逆变器提出了一种电压区间分区控制方法，利用电压变化提供无功控制指令，但其仅在电压越限时输出无功；文献[13]将逆变器输出电压的反馈控制设置为一级控制，通过协调其与二级区域优化过程来实现暂稳态控制；文献[14]设立了电压告警区间，并提出了调节优先系数，先通过判断电压是否位于区间，再利用优先系数进行排序来确定率先调节的逆变器；文献[15]提出了一种有功调整的逆变器电压控制策略，在逆变器无功容量不足的时候，该策略削减有功以补充无功，但其未涉及无功直接控制。

在逆变器与无功设备的协调无功优化方面，文献[16]分别考虑了分布式光伏在正常运行与弃光条件下的无功出力，在经济性最优条件下进行无功优化配置；文献[17]考虑光伏有功出力与负荷波动，对传统无功设备进行小时级的无功优化，并考虑网损与稳定，对光伏无功出力进行分钟级的无功优化，但该优化方法未考虑其他无功设备；文献[18]针对风电、光伏的出力预测数据，对电压、网损等分别建立优化函数，并利用改进差分方法进行优化求解，但其未涉及新能源的无功能力；文献[19]考虑了风电、光伏的无功特性，联合静止无功发生器（static var generator，SVG）与并联电容器，利用单纯形法进行无功优化求解，但该算法仅适用于线性目标函数与线性约束，无法求解非线性问题。

近些年来，许多中国学者对新型无功补偿装置磁控电抗器（magnetically controlled reactor，MCR）的研究出现了较大的突破。MCR本质上是一个可变电感，可通过控制晶闸管导通角来改变电感值，进行输出无功的连续平滑调节，实现对电网电压的精确控制。文献[20]对MCR的结构及其控制逻辑进行研究，在220 kV变电站的无功电压控制中引入MCR进行电压调控，并通过仿真证明了引入的MCR可实现变压器各侧电压合格及无功平衡。文献[21]针对海上风电送出电缆充电功率大的问题，在保证风机的正常运行、充分利用其自身的无功能力的条件下，在变电站高压侧安装MCR进行无功补偿，使风机能正常并网。目前，对MCR的研究较多集中在其控制策略及其本体性能提升这两个方面。文献[22-23]考虑将MCR并入无功电压综合控制系统，进行区域无功电压的智能调控，以取代传统无功设备、降低经济成本。文献[24]将MCR与SVG协同，对牵引轨道交通进行混合补偿。文献[25]在直流输电工程中引入MCR，对送端电压暂升工况进行调控，得到MCR在抑制暂态过电压峰值方面的有益效果。这些MCR大多应用于场站侧的直接补偿，未涉及参与配网区域无功电压的控制。考虑其无功平滑调节与自动电压控制（automatic voltage control，AVC）的系统适配特性，可用其进行配网无功电压控制。

基于以往研究，本文提出采用经济效益更佳的MCR与光伏逆变器共同协调区域电网无功电压调节，改善电网电压质量。本文还提出一种基于电压分区权重自适应的光伏逆变器和磁控电抗器无功电压协调控制方案。首先，确定光伏逆变器的控制方式是利用电压分区、自适应权重系数的综合控制；其次，考虑电压变化对于无功的反馈以及有功

及功率因数的限制下的无功要求；再次，以电压偏差、网损最小为最优条件，建立目标函数；最后，考虑光伏无功、磁控电抗器无功，利用改进的量子粒子群算法进行无功优化。该方法能有效减小电压波动幅度，降低电压越限风险。

1 配电网无功电压控制方法

1.1 传统配电网无功电压控制方法

传统配电网呈辐射状，伴随着能量单向传输过程，其无功电压控制方式较为简单，常见的调控方法有调节变压器分接头、投切电容/电感器、使用静止无功补偿器(static var compensator，SVC)、网络重构等。

调节变压器分接头通过改变电网的功率分布来调节网络节点的电压[26]，其操作简单，但调节档位使其效果具有离散性的特点；网络重构通过改变配电系统的网络参数，改变电网的功率分布来调节电压[27-28]，其执行较复杂；投切电容/电感器成本较低，应用较为广泛[29]，但其调节速度慢、次数有限、精度较低；SVC包括晶闸管控制的电抗器(thyristor controlled reactor，TCR)、晶闸管投切的电容器(thyristor switched capacitor，TSC)与其他混合型器件，其输出电压谐波含量高[30]，但投切次数有限、不能实现平滑调节。

随着电力系统的发展与智能电网的构建，新能源渗透率增加，传统配电网的无功电压调节方式也在不断补充和优化。

1.2 基于光伏逆变器的无功电压控制方法

1.2.1 基于无功调节的电压控制方法

分布式光伏并网结构为电网提供了一种新的无功补偿方式，光伏逆变器的桥式结构能在保持输出有功功率的同时，向电网提供一定的感性或容性无功功率，使其具备一定的无功调压能力。基于逆变器无功调节的电压控制方法有3种。

1) 基于恒无功功率Q的控制。

该控制方法是控制光伏系统无功输出为给定值的一种控制手段。Q为向电网输出的无功功率。通常，此无功值由上级控制中心经计算或人为设置后进行下发，使并网点电压处于正常范围或功率因数最优。

2) 基于功率因数$\cos\varphi$与无功功率P的$Q\left(\cos\varphi(P)\right)$控制。

该控制方法是控制光伏并网点的功率因数为给定值或在给定范围内。在控制过程中，有功跟随最大功率跟踪(maximum power point tracking，MPPT)而变化，为维持功率因数恒定，无功也会跟随有功的变化而变化。

若控制并网点功率因数为给定值，则根据该给定值计算无功后对逆变器进行调控；若控制并网点功率因数在给定范围内，依据《光伏发电站并网运行控制规范》(GB/T 33599—2017)，并网点的功率因数范围应为[−0.95，0.95]，即$Q\left(\cos\varphi(P)\right)$策略。

3)基于并网点电压的$Q(U)$控制。

该控制方法通过检测并网点的电压值，判断其是否在所规定的运行电压范围内，$Q(U)$控制曲线如图1所示。在图1中，$Q_{\max}$为光伏输出的无功上限值。从图1中可以看出，电压可分为5个区间。$[U_2, U_3]$为电压正常波动范围区间。在此区域内，无功不输出；$[U_1, U_2]$、$[U_3, U_4]$为电压偏离目标范围但仍可接受的区间，此时的逆变器通过电压偏离范围成比例的输出容性或感性无功；$[0, U_1]$、$[U_4, \infty]$为电压发生越限的区间，此区间的逆变器发出最大的容性或感性无功以降低电压的越限程度。

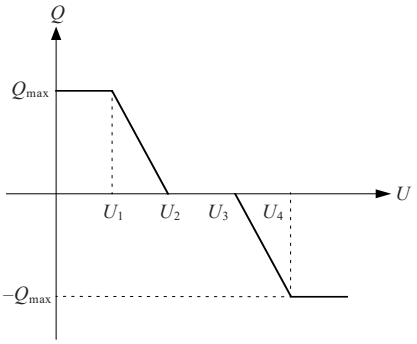


图1 $Q(U)$控制曲线

Figure 1 $Q(U)$control curve

1.2.2 基于电压分区权重自适应的有功-无功协调电压控制方法

U为并网点电压，$Q(U)$控制即并网点电压无功控制。该控制非常依赖控制参数的设置，电压无功曲线的斜率对其影响较大，但实际电网运行条件复杂，固定的参数设置可能无法适应变化的工况，这会影响控制效果。$Q\left(\cos\varphi(P)\right)$策略受有功与功率因数的约束，其控制的无功输出范围较窄。在无功需求大的场景下，该策略无法做到及时调节；在电网电压波动大的情况下，该策略无法稳定地对电压进行调节。在实际应用中，往往须在多个目标之间权衡，单一的控制目标限制了无功电压调节的适用性。因此，本文综合这些单一控制方法，提出一种基于光伏逆变器的电压分区、权重自适应的有功-

无功协同电压调节策略 $Q\left(U,\cos\varphi(P)\right)$。其基本思想是通过检测光伏并网点电压来控制逆变器所发无功，该策略不仅涉及由并网点电压 U 直接对所发无功 Q 的反馈，还涉及 $\cos\varphi(P)$ 对无功 Q 的反馈，并将这二者的 Q 值进行加权处理，最终得到逆变器的无功指令。

与单一策略相比，$Q(U)$ 与 $Q\left(\cos\varphi(P)\right)$ 的综合策略通过无功来控制电压，适用场景更广泛、可靠性更高。该综合控制策略充分利用逆变器的无功调节能力，能迅速做出反应，不仅可以改善电压，还能尽可能地将功率因数维持在规定的范围内。

令 U 直接控制得到的 Q_1 的权重为 α，P 和 $\cos\varphi$ 间接控制的 Q_2 的权重为 β，则光伏逆变器所提供的无功 Q 为

$$Q=\alpha Q_1+\beta Q_2 \tag{1}$$

在式(1)中，$\alpha+\beta=1$。当 $\alpha=1$ 时，仅通过 $Q(U)$ 进行无功控制；当 $\beta=1$ 时，仅通过 $Q\left(\cos\varphi(P)\right)$ 进行无功控制。

电压分区示意图如图 2 所示。在图 2 中，P_{mppt} 为光伏 MPPT 输出的最大有功功率；U_{L1}、U_{L0}、U_{U0}、U_{U1} 将电压分为 5 个区域。其中，目标电压范围为 $\left[U_{\mathrm{L0}},U_{\mathrm{U0}}\right]$，电压上、下限分别为 U_{U1}、U_{L1}。

1) A 区域。电压超过目标区间的下限，此时的光伏系统工作模式为 MPPT 模式，输出的有功功率恒为最大值。$Q(U)$ 控制的无功恒为最大无功输出，$Q\left(\cos\varphi(P)\right)$ 控制的无功取决于有功出力大小。当有功出力小于 $0.5P_{\mathrm{N}}$（P_{N} 为额定有功功率）时，$Q\left(\cos\varphi(P)\right)$ 控制的无功输出为 0 MVar；当有功出力大于 $0.5P_{\mathrm{N}}$，随着有功出力增大，无功输出随之增大。该区域内有功不削减，$Q(U)$ 控制的无功更大。

2) B 区域。电压低于目标运行电压，但仍未越其范围下限，此时的光伏系统的工作模式为 MPPT。$Q(U)$ 控制的无功取决于电压相较于 U_{L0} 的偏移程度；$Q\left(\cos\varphi(P)\right)$ 控制的无功取决于有功出力大小。若有功出力大于 $0.5P_{\mathrm{N}}$ 时，$Q(U)$ 与 $Q\left(\cos\varphi(P)\right)$ 控制的无功差别不大。

3) C 区域。电压在目标区间内，此时的光伏系统工作模式为 MPPT。$Q(U)$ 控制的无功为 0 MVar，$Q\left(\cos\varphi(P)\right)$ 控制的无功取决于有功出力大小。此时，没有或仅有少量无功输出。

4) D 区域。电压超过目标运行电压区间但未越其上限，此时的光伏系统工作模式为 MPPT。与 B 区域的控制情况类似，此时的 $Q(U)$ 与 $Q\left(\cos\varphi(P)\right)$ 控制的无功差别不大。

5) E 区域。电压越目标区间上限，此时的 $Q(U)$ 控制的无功输出最大，若此情况下的光伏有功输出大，$Q\left(\cos\varphi(P)\right)$ 控制也会输出一定无功。若无功输出仍不能将电压降低至安全区间，则会削减有功来抑制过电压。

通过区间划分、权重变化来确定无功值的大小，从而实现对光伏逆变器的控制。在电压运行于目标电压区间时，即在 $Q(U)$ 方式最优的情况下，充分考虑 $Q\left(\cos\varphi(P)\right)$ 方式；在电压超出目标电压区间但未越限的情况下，综合这两种控制方式，实现电压与功率因数的最优；在电压超过目标区间的情况下，利用 $Q(U)$ 方式实现电压对无功的直接反馈，进行快速无功补偿，对电压进行调节。权重系数自适应值见表 1。

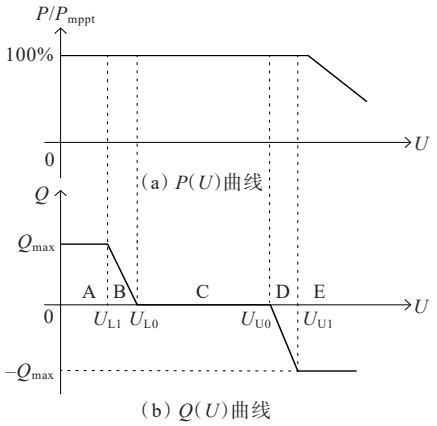


图 2　电压分区示意

Figure 2　Voltage partition

表 1　权重系数自适应值

Table 1　Adaptive values of weighting coefficient

区域	控制模式	α	β
A	无功控制	1	0
B	无功控制	$\dfrac{U-U_{\mathrm{L0}}}{U_{\mathrm{L1}}-U_{\mathrm{L0}}}$	$1-\dfrac{U-U_{\mathrm{L0}}}{U_{\mathrm{L1}}-U_{\mathrm{L0}}}$
C	无功控制	0	1
D	无功控制	$\dfrac{U-U_{\mathrm{U0}}}{U_{\mathrm{U1}}-U_{\mathrm{U0}}}$	$1-\dfrac{U-U_{\mathrm{U0}}}{U_{\mathrm{U1}}-U_{\mathrm{U0}}}$
E	无功控制 有功控制	1	0

此电压驱动的权重自适应机制的过程：先由检测模块实时记录并网点电压，根据图 2 进行电压区

间判别;再根据表1区间权重计算式确定权重系数;然后,根据权重系数及各策略的单一无功指令,计算总无功指令;最后,下发指令至光伏控制系统的无功外环,使光伏输出相应无功。

综合控制策略的权重系数依据并网点电压的变化而自适应地改变,在可不削减有功的同时,充分利用光伏逆变器的剩余容量,这不仅可维持并网点电压稳定,还能使功率因数尽可能地保持在正常范围内。

1.3 基于磁控电抗器的无功电压控制方法

MCR是一种新型的无功补偿装置,其通过改变控制回路晶闸管触发角来控制直流控制回路电流大小,改变铁心磁饱和度,进而影响其感抗大小[31-33]。

相较于SVG,MCR无功补偿装置结构简单、占地面积小、电力电子元件依赖性小,且能适用于高电压等级的系统。

将MCR与可投切电容器并联组合,利用MCR平滑吸收/输出的无功补偿电容阶梯状输出的无功,以实现无功从容性到感性区域的连续调节。

MCR的无功电压控制示意图如图3所示。在图3中,$U_{\min}$为电压下限值;$U_{\max}$为电压上限值;$Q_{\min}$为电压在限值以内的无功出力;Q_{L}为电压越上限的感性出力;Q_{C}为越下限的容性出力。从图3中可以看出,以电压为首要控制目标,可将电压分为3个区间,当并网点电压在区间$[U_{\min}, U_{\max}]$内时,以无功为控制目标,根据上级下发的无功优化指令输出无功,实现系统的经济运行;当并网点电压超过规定电压的上限或者下限时,采取电压控制模式,及时响应(电压越上限时,增加磁控电抗器的输出容量,抑制电压升高,使系统电压回落到电压允许上限;电压越下限时,减小磁控电抗器的输出容量,使系统电压升高到电压允许下限)。电压发生变化时,MCR的输出无功计算式为

$$\Delta Q = \frac{U_{\mathrm{ref}}}{X_{\mathrm{r}}}\Delta U_{\mathrm{s}} \tag{2}$$

式中,ΔQ为无功输出调节量;ΔU_{s}为MCR并网点电压变化量;U_{ref}为电压参考值;X_{r}为等效电抗值。

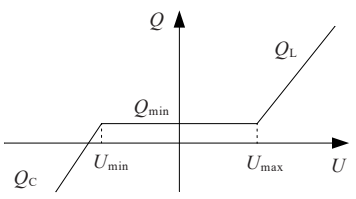


图3 MCR的无功电压控制示意图

Figure 3 MCR reactive power voltage control

2 分布式光伏配电网的无功优化模型

2.1 无功优化数学模型

无功优化在电力系统安全稳定运行的基础上,通过合理调整系统中无功功率的流动和分布情况,以达到降低系统有功损耗、提高电压质量与经济效益等目的。含分布式光伏接入的配电网系统在进行无功优化运行时,应先建立包括目标函数、约束条件在内的数学模型[34]。

2.1.1 目标函数

考虑电网运行的经济性与稳定性,综合计算系统网损与节点电压偏差,建立有功网损最小、电压偏差最小的目标函数。

1) 系统有功网损。

$$\min P_{\mathrm{loss}} = \min \sum_{k=1}^{N_k} G_k\left(U_i^2 + U_j^2 + 2U_iU_j\cos\theta_{ij}\right) \tag{3}$$

式中,P_{loss}为系统有功网损;N_k为网络支路总数;G_k为第k条支路的电导;U_i与U_j分别为第i个节点与第j个节点电压幅值;θ_{ij}为节点i、j之间的相角差。

2) 节点电压偏差。

$$\min U = \min \sum_{i=1}^{N_{\mathrm{b}}} \left| \frac{U_i - U_{\mathrm{ref}}}{U_i^{\max} - U_i^{\min}} \right| \tag{4}$$

式中,U为系统节点电压总偏差;N_{b}为网络节点总数;$U_i^{\max}$与$U_i^{\min}$分别为节点i电压U_i的最大值与最小值。

3) 加权综合目标函数F。

$$\min F = a\frac{P_{\mathrm{loss}}}{P_0} + b\frac{U}{U_0} \tag{5}$$

式中,P_0、U_0分别为系统网损、电压偏差的初值;a、b分别为系统网损、电压偏差的权重系数,a、b的取值可基于工程经验,也可基于优化目标的重要程度,且须满足$a+b=1$。

2.1.2 约束条件

1) 等式约束。

等式约束即潮流方程约束,即

$$\begin{cases} P_i = U_i\sum\limits_{j\in i} U_j\left(G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij}\right) \\ Q_i = U_i\sum\limits_{j\in i} U_j\left(G_{ij}\sin\theta_{ij} - B_{ij}\cos\theta_{ij}\right) \end{cases} \tag{6}$$

式中,P_i与Q_i分别为流入节点i的有功与无功值;G_{ij}与B_{ij}分别为节点i、j之间所连支路的电导与电纳。

2) 不等式约束。

系统各节点电压幅值须在规定运行范围内,即

$$U_i^{\min} \leqslant U_i \leqslant U_i^{\max} \tag{7}$$

光伏输出有功功率在光伏系统容量范围内：

$$P_{\mathrm{pv},i}^{\min} \leqslant P_{\mathrm{pv},i} \leqslant P_{\mathrm{pv},i}^{\max} \tag{8}$$

式中，$P_{\mathrm{pv},i}^{\min}$、$P_{\mathrm{pv},i}^{\max}$ 分别为光伏输出有功 $P_{\mathrm{pv},i}$ 的上、下限。

无功补偿设备 MCR 的无功输出 Q_{MCR} 不应超出容量范围，即

$$Q_{\mathrm{MCR}}^{\min} \leqslant Q_{\mathrm{MCR}} \leqslant Q_{\mathrm{MCR}}^{\max} \tag{9}$$

式中，$Q_{\mathrm{MCR}}^{\max}$、$Q_{\mathrm{MCR}}^{\min}$ 分别为 MCR 出力 Q_{MCR} 的上、下限。

2.2　改进的量子粒子群算法

量子粒子群算法（quantum particle swarm optimization，QPSO）[35]是一种基于粒子群算法（particle swarm optimization，PSO）的改进优化算法，其将粒子状态用量子比特来表示。

PSO 在电网的无功优化中得到了较广泛的应用。在 PSO 上改进而来的 QPSO 的搜索效率更高，收敛精度更优，全局搜索能力更强，有效避免陷入局部最优。QPSO 能更有效地对本文的多目标问题进行高维非线性分析。QPSO 的更新表达式为

$$\begin{cases} x_i(t+1) = P_i(t) \pm \alpha(t)\left| M_{\mathrm{best}}(t) - x_i(t)\right| \ln\left(\dfrac{1}{\mu(t)}\right) \\ P_i(t) = \psi(t) P_{\mathrm{best},i} + \left[1-\psi(t)\right] G_{\mathrm{best},i} \\ \alpha(t) = m - \dfrac{(m-n)t}{t_{\max}} \\ M_{\mathrm{best}}(t+1) = \dfrac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} P_{\mathrm{best},i} \end{cases} \tag{10}$$

式中，t 为当前迭代次数；$x_i(t)$ 为粒子 i 在 t 次迭代的位置；N 为粒子数量；$P_i(t)$ 为粒子 i 在 t 次迭代由全局最优与局部最优所确定的随机位置；$\mu(t)$、$\psi(t)$ 均为 $[0,1]$ 的随机数；$\alpha(t)$ 为 t 次迭代的收缩扩张系数，与其符号 ± 以模拟量子行为中概率性的位置更新；$P_{\mathrm{best},i}$ 为粒子 i 的局部最优值；$G_{\mathrm{best},i}$ 为粒子 i 的全局最优值；$M_{\mathrm{best}}(t)$ 为 t 次迭代的局部最优的均值；m、n 均为收缩扩张系数的影响因素；$t_{\max}$ 为最大迭代次数；N 为粒子总数。

为减小局部吸引因子对粒子收敛区域的限制，避免粒子陷入局部最优解，对 QPSO 算法进行改进。重新构造收缩扩张系数 α 的计算式，即

$$\alpha = m + n\frac{t_{\max} - t}{t_{\max}} \tag{11}$$

在式（11）中，m 与 n 一般均取值为 0.5。在每次迭代过程中，对 α 进行实时更新，使粒子各阶段均能发挥其搜索能力。

QPSO 流程如图 4 所示。在此无功优化过程中，粒子为优化容量，适应度表达式为目标函数，优化得到的是特定工况与位置下的无功补偿大小。

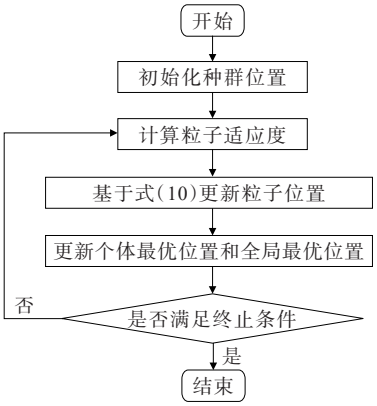


图 4　QPSO 流程

Figure 4　QPSO process

3　算例分析

3.1　算例 1

为验证本文所提的光伏逆变器电压分区权重自适应的无功电压调节策略的可行性与有效性，基于 IEEE 33 节点系统，建立改进的含分布式光伏的配电网模型。该含分布式光伏的 33 节点系统如图 5 所示。在图 5 中，在节点 10、15、24、30 处分别接入分布式光伏。系统的基准电压 U_{B} 为 10 kV，基准功率 S_{B} 为 10 MV·A，分布式光伏系统的容量 S_{pv} 为 2 MW，无功最大输出 $Q_{\max}$ 为 1.2 MVar，其余负荷参考原 IEEE 33 节点系统的，保持不变，系统总负荷为 3.715+j2.300 MV·A。

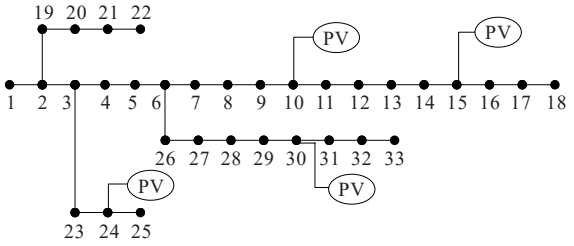


图 5　含分布式光伏的 IEEE 33 节点系统

Figure 5　IEEE 33-node system with distributed photovoltaics

设节点 1 为平衡节点，其电压与相位恒定，设光伏接入节点为负的 PQ 节点，其余节点均为 PQ 节点。

《电能质量 供电电压偏差》（GB/T 12325—2008）规定 10 kV 及以下三相供电电压偏差不超过

标称电压的±7%,《电能质量 电压波动和闪变》(GB/T 12326—2008)规定允许电压波动和闪变均不得超过标称电压的±3%。因此,在逆变器的电压分区权重自适应的控制策略中,将稳定运行区间设定为[0.93,1.07] p.u.,理想电压运行区间设定为[0.97,1.03] p.u.。

在本算例中,仅考虑光伏逆变器的无功支撑作用。对表2中不同光伏出力、不同控制策略所确定的12种工况逐一进行仿真分析。

表2 仿真工况

Table 2 Simulation working conditions

工况	光伏出力/MW	光伏控制策略
1-1	2.00	不发无功
1-2	2.00	$Q(U)$控制
1-3	2.00	$Q(\cos\varphi(P))$控制
1-4	2.00	$Q(U,\cos\varphi(P))$控制
2-1	1.50	不发无功
2-2	1.50	$Q(U)$控制
2-3	1.50	$Q(\cos\varphi(P))$控制
2-4	1.50	$Q(U,\cos\varphi(P))$控制
3-1	0.25	不发无功
3-2	0.25	$Q(U)$控制
3-3	0.25	$Q(\cos\varphi(P))$控制
3-4	0.25	$Q(U,\cos\varphi(P))$控制

在不同光伏出力、不同逆变器控制策略下计算系统潮流,所得的系统电压分布分别如图6~8所示,各种工况下网损和电压偏差计算结果见表3。

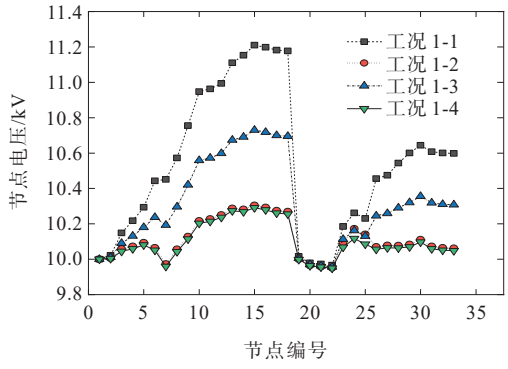


图6 光伏出力2.00 MW时不同策略电压分布

Figure 6 Voltage distribution of different strategies at photovoltaic output of 2.00 MW

分析这12种工况下的仿真结果可知,在光伏出力为0.25 MW时,系统电压有越下限的风险,$Q(U,\cos\varphi(P))$控制工况与不提供无功工况相比,

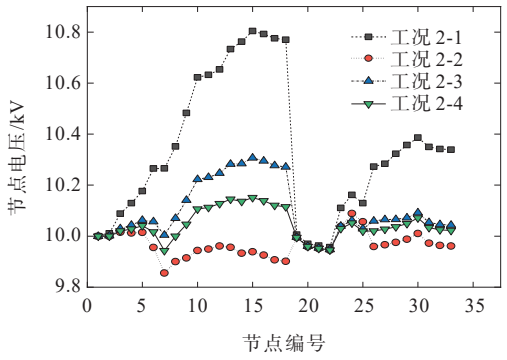


图7 光伏出力1.50 MW时不同策略电压分布

Figure 7 Voltage distribution of different strategies at photovoltaic output of 1.50 MW

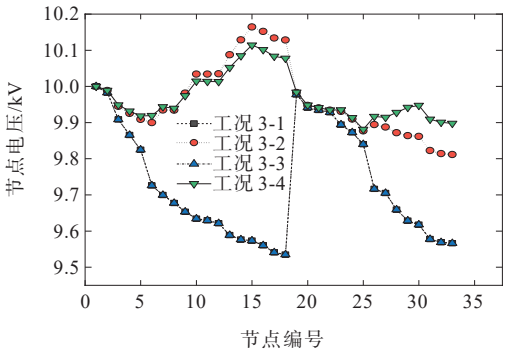


图8 光伏出力0.25 MW时不同策略电压分布

Figure 8 Voltage distribution of different strategies at photovoltaic output of 0.25 MW

表3 各种工况下网损和电压偏差计算结果

Table 3 Calculation results of transmission losses and voltage deviations under various working conditions

工况	网损/kW	平均电压偏差/%
1-1	524	4.28
1-2	1 101	1.17
1-3	753	3.16
1-4	864	1.21
2-1	261	3.48
2-2	677	0.49
2-3	483	1.09
2-4	459	0.57
3-1	56	2.71
3-2	105	0.92
3-3	56	2.71
3-4	84	0.64

电压偏差从2.71%减小到0.64%;同时,网损有所增加,但增加程度不大,本文所提出的控制策略相较于较为常用的$Q(U)$控制策略,减少了21 kW的网损;光伏出力为2 MW时,系统电压越上限,本文

所提出策略能有效稳定电压分布，使平均电压偏差降低4.28%，且相较于$Q(U)$控制策略，本文所提策略的网损减少了237 kW。综合可知，本文所提出的策略对于电压网损的综合治理效果更好。

3.2　算例2

除了利用光伏系统的剩余无功外，考虑在此配电网系统中接入MCR无功补偿装置，利用MCR与光伏逆变器的协调作用进行无功电压调节。在该配电网系统中，节点22处新增1台MCR，其容量为5 MVar，此时的光伏输出功率为1.50 MW。为分析不同光伏出力波动下的优化效果，选取典型日光伏出力进行研究，采样时间间隔为30 min，共得到1 d内48个时刻的数据，对其进行优化与分析，其功率曲线如图9所示。

基于改进的QPSO，对其输出容量进行无功优化，设最大迭代次数为200。

在无功优化阶段，利用加权法将多目标优化问题转化为单目标优化问题。由于网损、电压这两者同等重要，故赋a、b的权重值分别为0.5、0.5。设置3种工况，进行无功优化仿真计算。无功优化工况见表4。

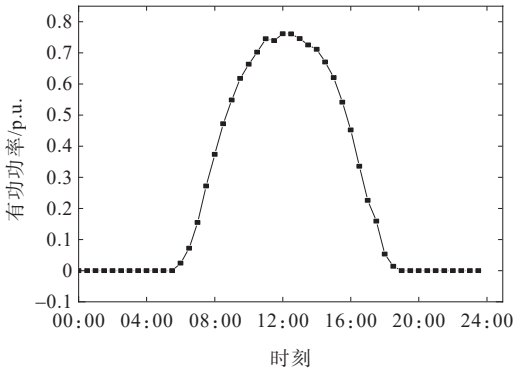


图9　典型日光伏出力曲线

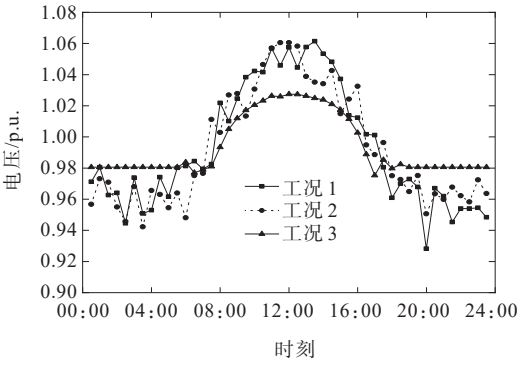
Figure 9　Typical daily photovoltaic output curve

表4　无功优化工况

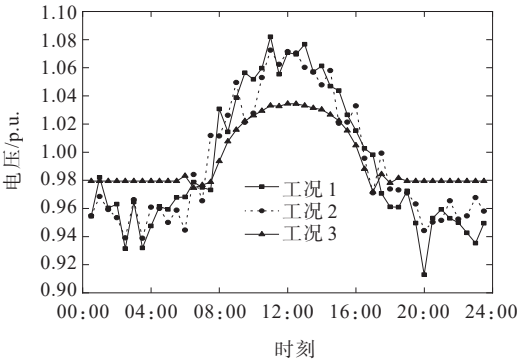
Table 4　Working conditions for reactive power optimization

工况	PV	MCR	优化方法
1	参与无功调节	不参与无功调节	PSO
2	参与无功调节	不参与无功调节	改进QPSO
3	参与无功调节	参与无功调节	改进QPSO

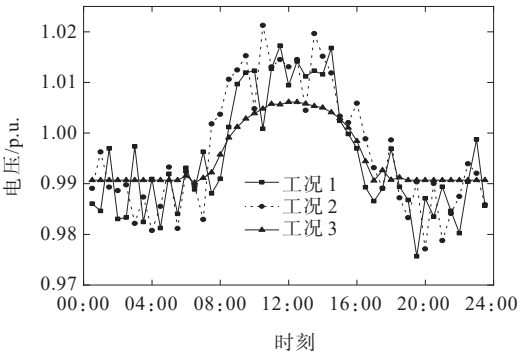
对这3种工况进行仿真分析，得到IEEE 33节点系统的光伏节点的无功优化电压分布曲线，如图10所示。从图10中可以看出，当PV、MCR均参与无功调节时，利用改进QPSO算法进行无功优化的电压分布情况最佳，此时的电压越限问题有明显的改善。这3种优化工况下光伏节点电压偏差平均值见表5。在日内无功优化下，工况1、2、3的有功网损



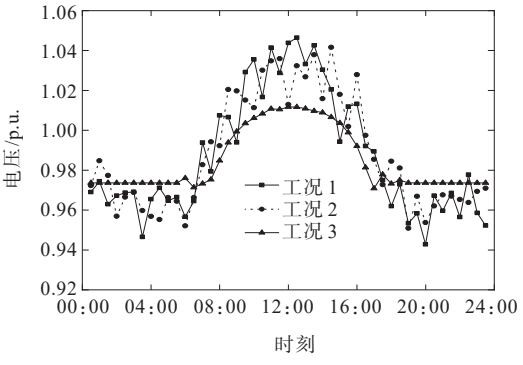
(a) 节点10电压变化曲线



(b) 节点15电压变化曲线



(c) 节点24电压变化曲线



(d) 节点30电压变化曲线

图10　光伏节点电压变化曲线

Figure 10　Voltage variation curves of photovoltaic nodes

分别为 6 753.498、4 897.453、4 090.312 kW。不难发现，利用QPSO协调MCR和光伏逆变器进行无功优化可显著降低节点电压偏差，光伏节点10、15、24、30的电压偏差最大降低程度分别为1.63%、2.32%、0.38%、0.49%。与PSO优化、MCR不参与时的QPSO优化结果相比，所提策略的总网损分别减少了2 663.186、807.141 kW。这些结果表明，MCR参与无功补偿能有效减少网络损耗、降低电压偏差。这些算例仿真验证了PV逆变器与MCR协调参与配电网无功调节在平衡电压分布、减小有功网损方面的有益效果。

表5 光伏节点电压偏差平均值

Table 5 Mean value of voltage deviation at photovoltaic nodes %

工况	节点10	节点15	节点24	节点30
1	0.035 333	0.043 981	0.010 987	0.024 514
2	0.033 903	0.040 100	0.011 845	0.027 847
3	0.019 029	0.020 691	0.007 221	0.019 583

4 结语

本文对光伏逆变器的无功电压控制策略及其与MCR无功补偿装置的协调无功优化进行研究，得出如下结论：

1）针对光伏逆变器的无功可控特性，提出基于电压分区权重自适应的控制策略，通过自适应计算各个电压区间的权重，得到不同电压值对应的无功出力大小，以实现对光伏逆变器的无功输出控制。算例表明，该策略在降低网损和电压偏差方面的综合效果更好。

2）考虑PV无功特性与配电网中无功设备MCR的协调无功优化，对网损、电压偏差加权建立单目标无功优化目标函数，利用改进QPSO算法进行无功优化计算，以实现无功出力的预分配，对改进的IEEE33节点算例进行仿真分析与比较。在协调控制的无功优化下的网损比仅PV参与无功调节的减少了2 663.186 kW，平均电压偏差降低，改进的QPSO的网损比传统PSO的网损减少了807.141 kW，且其平均电压偏差也降低了。这些均表明该策略比传统无功电压控制策略更好，能更有效地保持电网的安全、稳定、经济运行。

3）MCR的连续补偿能力协同PV的连续出力，在高比例分布式光伏接入的背景下，能提高新能源消纳能力，取代传统投切装置，降低设备建设成本，有利于稳态全网电压的调节。但其响应速度仍不足以应对电网的快速变化，在暂态电压抑制方面还须进一步的研究，优化MCR与光伏逆变器控制策略，拓宽设备协调的适用场景。

参考文献：

[1] 杨龙月，任烜辰，蔡智鹏，等．高光伏渗透率配电网电压控制策略研究综述[J]. 电网技术，2024，48(12)：5056-5070.
YANG Longyue, REN Xuanchen, CAI Zhipeng, et al. Review on voltage control strategies for high PV penetration distribution networks[J]. Power System Technology, 2024, 48(12): 5056-5070.

[2] 刘凡，陆建忠．我国中东部地区分布式光伏高质量发展探析[J]. 中国能源，2023，45(10)：43-52.
LIU Fan, LU Jianzhong. Research on distributed photovoltaics(PVs) development in central and Eastern China[J]. Energy of China, 2023, 45(10): 43-52.

[3] 王永利，张吉林，逄博，等．“双碳”目标下的分布式光伏发展前景[J]. 科技与创新，2023(15)：59-61.
WANG Yongli, ZHANG Jilin, PANG Bo, et al. Development prospect of distributed photovoltaic under the goal of “double carbon”[J]. Science and Technology & Innovation, 2023(15): 59-61.

[4] 李明东，李婧雯．“双碳”目标下中国分布式光伏发电的发展现状和展望[J]. 太阳能，2023(5)：5-10.
LI Mingdong, LI Jingwen. Development status and prospects of distributed pv power generation in China under the goal of emission peak and carbon neutrality[J]. Solar Energy, 2023(5): 5-10.

[5] 王永真，潘崇超，韩恺，等．“双碳”目标下中国综合能源服务的态势辨析与理论架构[J]. 全球能源互联网，2023，6(4)：379-389.
WANG Yongzhen, PAN Chongchao, HAN Kai, et al. Situation identification and theory architecture of integrated energy services under dual carbon goal in China[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(4): 379-389.

[6] 韩宇，周前，李勇，等．户用光伏接入的低压配电网电能质量问题分析与附加损耗量化评估[J]. 电力科学与技术学报，2024，39(3)：177-186.
HAN Yu, ZHOU Qian, LI Yong, et al. Analysis of power quality issues and quantitative evaluation of additional losses in low voltage distribution networks connected to household photovoltaics[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 177-186.

[7] 袁昌昊，朱金大，倪建富．含分布式光伏的配电网双层协调电压优化方法[J]. 电力工程技术，2023，42(6)：74-82.
YUAN Changhao, ZHU Jinda, NI Jianfu. Coordinated

voltage optimization method in distribution network with distributed photovoltaic[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 74-82.

[8] 张伟骏, 李智诚, 陈大玮, 等 . 配网侧分布式储能系统的随机优化配置和选址方法[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 125-135.
ZHANG Weijun, LI Zhicheng, CHEN Dawei, et al. Stochastic optimal configuration and site selection method of grid-side distributed energy storage system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 125-135.

[9] 郑斌, 袁文海, 董小顺, 等 . 基于有载分接开关协调的主动配电网电压控制研究[J]. 计算技术与自动化, 2021, 40(4): 26-30.
ZHENG Bin, YUAN Wenhai, DONG Xiaoshun, et al. Review and prospect of active distribution network voltage control based on on-load tap changer coordination[J]. Computing Technology and Automation, 2021, 40(4): 26-30.

[10] YANG D S, WANG X F, LIU F C, et al. Adaptive reactive power control of PV power plants for improved power transfer capability under ultra-weak grid conditions[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1269-1279.

[11] 郑许林, 袁源, 柏晶晶, 等 . 分布式光伏无功电压主动支撑控制方法[J]. 可再生能源, 2023, 41(12): 1685-1690.
ZHENG Xulin, YUAN Yuan, BAI Jingjing, et al. Active support control method of distributed photovoltaic reactive power and voltage[J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(12): 1685-1690.

[12] 康田园, 刘科研, 李昭 . 基于光伏逆变器调节的中低压配电网电压分层协调控制策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(3): 1225-1234.
KANG Tianyuan, LIU Keyan, LI Zhao. Hierarchical voltage coordination control strategy of middle-and low-voltage level power distribution network based on photovoltaic inverter adjustments[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1225-1234.

[13] 谢芝东, 陈璐, 汪晓彤, 等 . 光伏电站电压无功快速精准控制策略研究及应用[J]. 电气工程学报, 2023, 18(1): 235-243.
XIE Zhidong, CHEN Lu, WANG Xiaotong, et al. Research and application of fast accurate voltage and reactive power control strategy for photovoltaic power station[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(1): 235-243.

[14] 周永刚, 陈娟, 夏鹏 . 计及光伏无功调节能力的配电网电压控制研究[J]. 电气自动化, 2022, 44(5): 25-28.
ZHOU Yonggang, CHEN Juan, XIA Peng. Research on distribution network voltage control Considering Photovoltaic reactive power regulation capability[J]. Electrical Automation, 2022, 44(5): 25-28.

[15] 俞智鹏, 汤奕, 戴剑丰, 等 . 基于有功自适应调整的光伏电站无功电压控制策略[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1900-1907.
YU Zhipeng, TANG Yi, DAI Jianfeng, et al. Voltage/var control strategy of PV plant based on adaptive adjustment of active power[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1900-1907.

[16] 王晶, 王曦炜, 杨增力, 等 . 考虑分布式光伏无功出力特性的配电网无功优化配置[J]. 农村电气化, 2024(3): 22-26.
WANG Jing, WANG Xiwei, YANG Zengli, et al. Optimal allocation of reactive power compensation in distribution network considering distributed photovoltaic reactive power output capability[J]. Rural Electrification, 2024(3): 22-26.

[17] 茹秋实, 米雪峰, 宋志刚, 等 . 含可控光伏的主动配电网多时间尺度鲁棒优化调度[J]. 广东电力, 2022, 35(12): 11-21.
RU Qiushi, MI Xuefeng, SONG Zhigang, et al. Multi-time scale robust optimal scheduling of active distribution network with controllable photovoltaic[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(12): 11-21.

[18] 周立, 王杰, 谢磊, 等 . 含分布式电源的配电网多目标无功优化[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2022, 34(5): 818-827.
ZHOU Li, WANG Jie, XIE Lei, et al. Multi-objective reactive power optimization of distribution network with distributed generation[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2022, 34(5): 818-827.

[19] 郭清元, 莫超, 吴杰康, 等 . 分布式电源接入的配电系统多类型无功源出力优化方法[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 211-219.
GUO Qingyuan, MO Chao, WU Jiekang, et al. Multi-type reactive power output optimization method of distribution system with distributed generations[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 211-219.

[20] 陈柏超, 宋继明, 周攀, 等 . 基于MCR和MSVC的220 kV变电站多电压等级无功电压综合控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 230-237.
CHEN Baichao, SONG Jiming, ZHOU Pan, et al. MCR and MSVC based voltage and reactive power combination control of different voltage level in 220k V substation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 230-237.

[21] 熊信恒, 陈柏超, 袁佳歆 . 考虑海底电缆的海上风电场动态感性无功补偿[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(4): 591-596+602.
XIONG Xinheng, CHEN Baichao, YUAN Jiaxin.

Dynamic inductive reactive power compensation of offshore wind farms considering submarine cable[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(4): 591-596+602.

[22] 陈锴, 杨帆, 唐剑, 等. 高比例磁控电抗器区域无功电压精准调控系统及控制策略研究[J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 1979-1986.
CHEN Kai, YANG Fan, TANG Jian, et al. Regional AVC coordinated precise control based on high proportion MCR[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1979-1986.

[23] 李付强, 张文朝, 潘艳, 等. 基于改进深度确定性策略梯度算法的电压无功优化策略[J]. 智慧电力, 2024, 52(5): 1-7+30.
LI Fuqiang, ZHANG (Wen)(ChaoZhao), PAN Yan, et al. Reactive voltage optimization strategy based on improved depth deterministic strategy gradient algorithm [J]. Smart Power, 2024, 52(5): 1-7+30.

[24] 朱翔, 高江魁. 110kV 自励磁磁阀式磁控电抗器与SVG组合补偿装置在地铁中的应用[J]. 公路, 2021, 66(11): 261-265.
ZHU Xiang, GAO Jiangkui. Application of 110kV self-excited magnetic valve type magnetron reactor and SVG combined compensation device in subway[J]. Highway, 2021, 66(11): 261-265.

[25] 窦宇宇, 齐四清, 郑博文, 等. 基于新型磁控电抗器的直流系统暂态压升抑制方法[J]. 电瓷避雷器, 2023(6): 55-65.
DOU Yuyu, QI Siqing, ZHENG Bowen, et al. Suppression metlad of new magnetic controlled reactor to transient voltage rise of DC system[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(6): 55-65.

[26] 战文华, 张国彦, 姜磊, 等. 基于新型调压装置与正余弦算法的电压优化方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(2): 47-54.
ZHAN Wenhua, ZHANG Guoyan, JIANG Lei, et al. Voltage optimization method based on new voltage regulator and sine cosine algorithm[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(2): 47-54.

[27] 胥鹏, 王蓓蓓, 包宇庆, 等. 基于网络拓扑资源的配电网在线电压控制方法及其迁移强化学习求解[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7317-7328.
XU Peng, WANG Beibei, BAO Yuqing, et al. Online voltage control method based on topology resource of network and the solving method via transfer reinforcement learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7317-7328.

[28] 邢海军, 程浩忠, 张逸. 基于多种主动管理策略的配电网综合无功优化[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1504-1510.
XING Haijun, CHENG Haozhong, ZHANG Yi. Reactive power comprehensive optimization in distribution network based on multiple active management schemes[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1504-1510.

[29] 徐式蕴, 高雪峰, 李宗翰, 等. 计及功角摇摆和新能源切换特性的暂时工频过电压机理分析[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(8): 129-137.
XU Shiyun, GAO Xuefeng, LI Zonghan, et al. Mechanism analysis of temporary power frequency overvoltage considering rotor angle swinging and renewable energy switching characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(8): 129-137.

[30] 刘天慈. 基于直流侧电压平衡控制的静止无功补偿器控制策略研究[J]. 电工材料, 2023(6): 7-9.
LIU Tianci. Research on control strategy of static reactive power compensator based on DC voltage balance control[J]. Electrical Engineering Materials, 2023(6): 7-9.

[31] 李佳粤. 基于MCR型无功补偿装置的10kV线路末端低电压治理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023.
LI Jiayue. Research on low voltage control at the end of 10kV line based on MCR reactive power compensation device[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023.

[32] 陈嘉鹏, 江修波, 刘丽军, 等. 基于模糊神经网络的MCR电压无功控制[J]. 电力科学与技术学报, 2014, 29(4): 65-71.
CHEN Jiapeng, JIANG Xiubo, LIU Lijun, et al. Fuzzy-neural network based MCR voltage and reactive power control[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2014, 29(4): 65-71.

[33] WANG P, ZOU J L, MA X K. Stability analysis of magnetically controlled reactor for reactive power compensation based on small-signal model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(11): 8585-8594.

[34] 闫群民, 李勇, 李宏刚, 等. 分布式光伏配电网电压无功优化研究[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2024, 40(2): 31-37+85.
YAN Qunmin, LI Yong, LI Honggang, et al. Research on reactive power optimization of distribution network with distributed photovoltaic[J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 40(2): 31-37+85.

[35] 李丹. 基于混合算法的配电网无功补偿协调控制方法研究[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(1): 10-13.
LI Dan. Research on coordinated control method of reactive power compensation in distribution network based on hybrid algorithm[J]. Techniques of Automation and Applications, 2023, 42(1): 10-13.