

基于电力电子调压器的配电网电压 协调控制策略

赵建勇¹, 张震霄¹, 丁元杰², 余紫薇¹, 韩俊垚², 王生宏², 年珩¹, 李学荣²

(1. 浙江大学 电气工程学院(浙江省电机系统智能控制与变流技术重点实验室), 浙江杭州 310027; 2. 国网青海省电力公司 果洛供电公司, 青海 果洛 814000)

摘要: 针对补偿电容器等传统调压装置在配电网线路电压补偿中存在的调节范围小、速度慢等问题, 提出了基于电力电子调压器的稀疏地区配电网线路电压补偿方案, 并基于电力电子调压器, 设计了电压分层协调控制策略。首先将电力电子调压装置等效为节点功率注入模型, 通过粒子群算法优化计算等效节点有功、无功调节量, 即节点注入附加功率, 再通过附加功率进行潮流计算, 确定电力电子调压器补偿电压及相角, 实现功率补偿优化计算与潮流计算解耦。在改进的IEEE33节点等效模型系统中进行算例验证, 结果证明所提出的策略可有效地减少线路压降, 且将功率优化与潮流计算解耦可减小计算复杂性、提高运算精度。

关键词: 电力电子调压器; 线路压降; 节点功率注入模型; 电压补偿; PSO 双层优化控制

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed22673

Voltage Coordinated Control Strategy in Distribution Network Based on Power Electronic Voltage Regulator

ZHAO Jianyong¹, ZHANG Zhenxiao¹, DING Yuanjie², YU Ziwei¹, HAN Junyao²,
WANG Shenghong², NIAN Heng¹, LI Xuerong²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University (Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Control and Converter Technology for Motor Systems), Hangzhou 310027, Zhejiang, China; 2. Guoluo Power Supply Company, State Grid Qinghai Electric Power Company, Guoluo 814000, Qinghai, China)

Abstract: Aiming at the problems of small regulation range and slow speed of traditional voltage regulators such as compensation capacitors in distribution network line voltage compensation, a voltage compensation scheme of distribution network in sparse area was proposed, the voltage hierarchical coordinated control strategy was designed based on power electronic voltage regulator. Firstly, the power electronic voltage regulator was equivalent to the node power injection model. And the active and reactive power regulation quantities of equivalent node was calculated by particle swarm optimization algorithm, that is the additional power was injected into the node. Then, the power flow was calculated by the additional power to decide the compensation voltage and phase angle of the power electronic voltage regulator, the decoupling of power compensation optimization calculation and power flow calculation were realized. In the improved IEEE33 node equivalent model system, an example was given. The results show that the proposed strategy can effectively reduce the line voltage drop, moreover, the decoupling of power optimization and power flow calculation can reduce the calculation complexity and improve the calculation accuracy.

Key words: power electronic voltage regulator; line voltage drop; node power injection model; voltage compensation; double-layer optimal control of PSO

稀疏地区主要指位于高原、荒漠、极寒等不适宜人类生产生活的地区, 该类地区主要特点是

人口密度小、分布分散、用电量少。其中, 青海省果洛藏族自治州就是西部稀疏供电地区的典型

基金项目: 国网青海省电力公司科技项目(5228201900G5)

作者简介: 赵建勇(1987—), 男, 博士, 工程师, Email: jyzhao@zju.edu.cn

代表之一。2013年国家能源局制定并发布了《全面解决无电人口用电问题三年行动计划(2013—2015年)》,旨在解决包括青海地区46.9万人口的无用电问题。

为促进稀疏地区进一步发展,除需解决用电问题外,还需保证用户用电质量。配网供电半径与配网电压等级与线路长度关系密切,对于中低压配网来说,长距离输电若不采用有效的电压补偿方式,线路末端电压水平会十分不理想,其辐射区域电压将过低,严重影响用户用电质量。果洛地区配网供电线路长,负荷分散,若是通过升级改造或扩建配网,不仅投资巨大、回收效益少,还会对其生态环境造成一定伤害,因此需要采用设备补偿线路压降的方式延长供电半径。传统调压设备有:有载调压变压器(on-load tap changer, OLTC)、补偿电容器等,该类设备本质上为通过调节档位对系统提供无功补偿的离散变量^[1-2],调节范围有限,调节速度慢并且不可频繁投切。现柔性交流输电技术(flexible AC transmission systems, FACTS)发展迅速^[3],FACTS设备静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、静止同步串联补偿器(static synchronous series compensator, SSSC)、统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)^[4-7]等可实现连续调节,除电压控制外还可进行潮流控制^[8-10],但其应用场合大多为高压、特高压直流输电^[11]等主网建设,对于稀疏地区中低压配网不太适用,并且稀疏地区长距离输电主要问题是线路阻抗大、压降高,使节点电压在安全范围内运行、延长配网供电半径是主要实现目标,这样FACTS设备改善潮流分布的功能也不能得到充分应用,而电力电子调压器(power electronic voltage regulator, PEVR)可以弥补前述设备的缺点,作为稀疏配电网延长供电半径的手段的有效补充。

PEVR利用并联侧电路从线路获取进行电压补偿的有功功率,通过在串联侧采用直接电压控制或谐振控制实现负载侧电压的补偿,能够实现幅值的提升和电网电压谐波的消除。本文基于PEVR,针对稀疏地区长距离输电,线路末端节点电压过低这一情形,提出了采用多台PEVR参与中低压配网电压调节来延长线路供电半径的方法,并设计了基于粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法的分层控制策略,保证PEVR的安全有效运行,通过IEEE33节点的算例验证

了优化算法的有效性,实现稀疏地区长距离输电情况下电压的安全运行。

1 稀疏地区配网电压控制

传统的配电网电压补偿装置主要是固定电容器和可投切电容器,因其经济性得到广泛的应用,但由于电容器调压控制效果有静态误差,且投切电容器本质上属于离散控制,在运行控制上增加了维护和调度成本,且动态响应效果差,因此,本文采用基于电力电子调压器进行配电网电压的控制。

PEVR是一种适用于6 kV, 10 kV, 35 kV配电网的调压装置,通过电压的实时反馈实现电压的连续调节,其调节范围为电压参考值的 $\pm 10\%$ 。PEVR结构控制图如下图1所示。

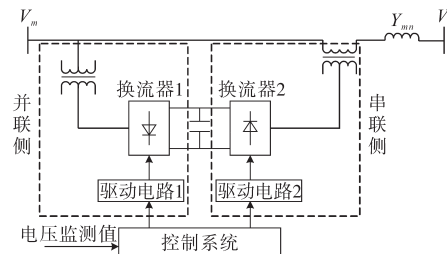


图1 PEVR结构图

Fig.1 PEVR structures

PEVR串并联侧换流器通过背靠背的形式由直流电容耦合在一起,两侧换流器均采用全控型器件(GTO或IGBT),通过电压逆变器产生功率补偿。PEVR并联侧功能与静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)相同^[12-13],通过并联变压器向接入点输入无功电流实现无功补偿,串联侧功能与SSSC相同^[14-15],通过串联变压器向系统提供一个幅值和相角均可连续改变的交流电压,PEVR实现了两种功能元件的结合,可增大原单个元件工作时电压的调节范围。

PEVR自身不能产生有功功率,因此串联侧向系统提供或吸收的有功是由并联侧从系统吸收或输出的有功与PEVR自身器件消耗有功的差值,有功功率的传送通过串、并联侧逆变器相耦合的直流电容完成,无功功率由串、并联侧逆变器提供。控制系统接收节点电压实时监测值,通过计算电压偏差是否在安全范围确定PEVR是否补偿,其补偿量由系统设置控制的给定值与参考值的差值经串、并联侧内部控制环运算后反馈至系统。

PEVR并联侧等效补偿电流及串联侧等效补

偿电压的相角均可实现 $0\sim 2\pi$ 范围内的调整,在功率坐标系中体现为四象限运行。虽然其调节范围广,但因有串联部分,所以在发生短路等过电流情况时容易击穿设备元件,因此在投运时需进行限电流控制,对控制系统要求较高。

由 PEVR 的结构可以看出,它接入输电线路时有两个接入点,且接入点经补偿后电压与相位不同,因此需在原有节点网络图中增加新的线路节点,以完成新的潮流计算,改变了系统网络结构,增加了潮流计算难度。因此将 PEVR 等效为节点功率注入模型,即将 PEVR 对母线电压的调节功能等效为接入处相邻两节点注入的附加功率,在保持原有网络结构不改变的情况下实现功率补偿优化求解与潮流计算相解耦,是一种简化计算难度的有效的解决方式。PEVR 电压协调控制框图如图 2 所示,其中, V_i 为节点 i 电压, λ 为允许电压偏差占比, V_N 为额定电压。

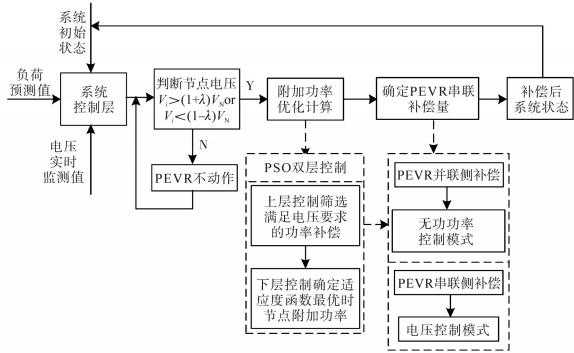


图2 PEVR电压协调控制框图

Fig.2 PEVR voltage coordination control block diagram

系统控制层采集负荷信息及系统状态信息,通过判断电压的实时监测值是否在安全范围内决定 PEVR 是否参与调控。若电压未在安全范围内运行,利用 PSO 双层控制进行优化求解,上层设置电压判断矩阵筛选出所有满足电压安全运行条件的节点附加注入功率,下层优化在上层筛选结果中确定有功网损及电压偏差最小时的有功/无功功率补偿量,即为 PEVR 节点注入的附加功率,由附加功率通过 PEVR 串并联侧控制方式确定各自补偿量,并将补偿后的电压及系统状态反馈至系统控制层。PEVR 并联侧采用无功功率控制模式,即给定并联侧注入节点无功功率大小,其给定值由优化计算得到;串联侧为电压控制模式,由附加功率通过潮流计算得到补偿电压的幅值及相角。反之,系统控制层计算判断出节点电压在允许偏差范围内,PEVR 不动作。

2 PEVR 控制模型

假设在节点 m 接入 PEVR,并联侧补偿等效为理想电流源 \dot{I}_{sh} ,其值可分解为与 m 节点电压 \dot{V}_m 垂直的电流分量 I_{shq} 及与 \dot{V}_m 同相的电流分量 I_{shd} , I_{shq} 为无功补偿电流维持 \dot{V}_m 电压, I_{shd} 则为有功电流,其产生的有功功率通过直流电容由串联侧与系统交换, I_{sh} 幅值满足 $0 \leq |\dot{I}_{sh}| \leq I_{shmax}$,相角范围 $\theta_{sh} \in [0, 2\pi]$, I_{shmax} 大小与并联侧换流器容量有关。串联侧补偿等效为理想电压源 \dot{E}_s ,幅值满足 $0 \leq |\dot{E}_s| \leq E_{smax}$,其最大值 E_{smax} 由串联侧换流器容量决定,其相角 θ_s 可补偿范围 $\theta_s \in [0, 2\pi]$,忽略内部损耗及线路对地导纳,其等效电路图如图 3。

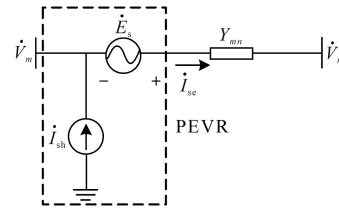


图3 PEVR等效电路图

Fig.3 PEVR equivalent circuit diagram

可以看出,因 PEVR 接入增加的节点会改变原来系统雅可比矩阵的大小,原始潮流计算方程不再适用,因此需要将其等效为节点功率注入模型^[16-17]。此模型相当于将 PEVR 的补偿作用等效为其接入点相邻两节点的附加功率输入,如图 4 所示,通过该方法可以在保持原有的网络结构的基础上进行优化计算。

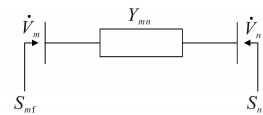


图4 节点等效注入模型

Fig.4 Node equivalent injection model

由上述可得:

$$S_{mf} = \dot{V}_m \cdot \dot{I}_{sh}^* - \dot{V}_m \cdot (\dot{E}_s \cdot Y_{mn})^* \quad (1)$$

$$S_{nf} = \dot{V}_n \cdot (\dot{E}_s \cdot Y_{mn})^* \quad (2)$$

式中: S_{mf}, S_{nf} 为 PEVR 注入节点 m, n 的附加复功率; \dot{V}_m, \dot{V}_n 为节点 m, n 的节点电压; \dot{I}_{sh} 为并联侧补偿电流; \dot{E}_s 为串联侧补偿电压; Y_{mn} 为线路阻抗 Z_{mn} 的倒数; ‘*’ 表示共轭。

附加功率有功、无功功率具体表达式如下:

$$P_m^f = V_m I_{sh} \cos(\theta_m - \theta_{sh}) - V_m E_s \cdot [G_{mn} \cos(\theta_m - \theta_s) + B_{mn} \sin(\theta_m - \theta_s)] \quad (3)$$

$$Q_m^f = V_m I_{sh} \sin(\theta_m - \theta_{sh}) - V_m E_s \cdot [G_{mn} \sin(\theta_m - \theta_s) + B_{mn} \cos(\theta_m - \theta_s)] \quad (4)$$

$$P_n^f = V_n E_s \cdot [G_{mn} \cos(\theta_n - \theta_s) + B_{mn} \sin(\theta_n - \theta_s)] \quad (5)$$

$$Q_n^f = V_n E_s \cdot [G_{mn} \sin(\theta_n - \theta_s) + B_{mn} \cos(\theta_n - \theta_s)] \quad (6)$$

式中: P_m^f, Q_m^f 为节点 m 注入的有功、无功功率; P_n^f, Q_n^f 为节点 n 注入的有功、无功功率; θ_m, θ_n 为节点电压 V_m, V_n 的相角; θ_{sh}, θ_s 分别为补偿电流 I_{sh} 和补偿电压 E_s 的相角; G_{mn}, B_{mn} 为 Y_{mn} 的实部和虚部。

PEVR 并联侧通过向节点注入无功电流产生无功补偿以维持接入点电压; 串联侧承担主要补偿作用, 通过补偿电压以提高母线电压的整体水平, 根据补偿方式的特点, 串并联侧采用不同的控制方式。不计 PEVR 内阻, 串并联侧有功功率关系如下式:

$$P_c + P_b = 0 \quad (7)$$

式中: P_c, P_b 分别为串、并联侧与系统交换的有功功率。

由图 3 可得:

$$\dot{V}_m + \dot{E}_s = \dot{I}_{se} Z_{mn} + \dot{V}_n \quad (8)$$

$$\dot{I}_{se} = (\dot{V}_m + \dot{E}_s - \dot{V}_n) \cdot Y_{mn} \quad (9)$$

$$P_c = \text{Re}(\dot{E}_s \dot{I}_{se}^*) \quad (10)$$

通过优化计算确定 PEVR 功率补偿后, 即确定 m, n 两节点注入的附加功率, 有:

$$S_{mf} = P_{mc} + jQ_{mc} \quad (11)$$

$$S_{nf} = P_{nc} + jQ_{nc} \quad (12)$$

式中: $P_{mc}, Q_{mc}, P_{nc}, Q_{nc}$ 分别为 m, n 两节点功率补偿后的有功、无功功率。

由式(1)、式(7)可得:

$$S_{mf} = -P_c + jQ_b - j\text{Rm}[\dot{V}_m (\dot{E}_s \cdot Y_{mn})^*] \quad (13)$$

$$S_{nf} = \dot{V}_n \cdot (\dot{E}_s \cdot Y_{mn})^* \quad (14)$$

式中: Q_b 为并联侧输入系统的无功功率。

联立式(11)~式(14)可得:

$$\dot{E}_s = \left(\frac{P_{nc} + jQ_{nc}}{\dot{V}_n} \right)^* \cdot Z_{mn} \quad (15)$$

联立式(11)、式(13)、式(15)可得:

$$Q_b = Q_{mc} + \text{Rm}[\dot{V}_m (\dot{E}_s \cdot Y_{mn})^*] \quad (16)$$

其中, Q_b, \dot{E}_s 满足以下约束条件:

$$0 \leq Q_b \leq Q_{b\max} \quad (17)$$

$$0 \leq \dot{E}_s \leq E_{s\max} \quad (18)$$

$$0 \leq \theta_s \leq 2\pi \quad (19)$$

式中: $Q_{b\max}$ 为并联侧输入系统的无功功率上限; $E_{s\max}$ 为补偿电压上限。

并联侧采用无功功率控制模式, 其给定无功功率大小即为式(16)中 Q_b 的大小, 串联侧为电压

控制模式, 其补偿电压即为式(15)中 \dot{E}_s 求解值。

3 PSO 双层控制模型

PEVR 节点附加功率为 PSO 双层控制优化计算所得节点的补偿功率, 上层通过电压判断矩阵选择满足在电压安全范围内运行的功率粒子, 下层控制寻优, 在已选粒子中遍寻适应度函数最小值作为最终输出结果^[18], 适应度函数为电压偏差及有功网损。

1) 电压判断矩阵 T 如下:

$$T = \begin{bmatrix} \Delta V_{L1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \Delta V_{LR} \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中

$$\Delta V_{Lj} = \begin{cases} 0 & |V_i - V_N| \geq \lambda V_N \\ 1 & |V_i - V_N| \leq \lambda V_N \end{cases} \quad (21)$$

2) 满足判断矩阵条件后, 下层控制有功网损 P_{loss} 表达式如下:

$$P_{\text{loss}} = \sum_{m=1}^R V_m \sum_{n=1}^R V_n (G_{mn} \cos\theta_{mn} + B_{mn} \sin\theta_{mn}) \quad (22)$$

式中: θ_{mn} 为节点电压 V_m, V_n 的相角差。

3) 电压偏差如下:

$$\Delta V = \sum_{m=1}^R |V_m - V_N| \quad (23)$$

为使有功网损及电压偏差两个目标函数能够在同一量纲内计算, 将其归一化处理, 即

$$\gamma_{P_{\text{loss}}} = P_{\text{loss}} / \sum P \quad (24)$$

$$\gamma_{\Delta V} = \Delta V / V_N \quad (25)$$

式中: $\sum P$ 为注入节点的有功功率之和。

在优化计算时, 需考虑 PEVR 节点等效的附加功率, 满足以下线路潮流约束:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_m + P_m^f - P_{mL} = \\ \quad V_m \sum_{k=1}^R V_k (G_{mk} \cos\theta_{mk} + B_{mk} \sin\theta_{mk}) \\ Q_m + Q_m^f - Q_{mL} = \\ \quad V_m \sum_{k=1}^R V_k (G_{mk} \sin\theta_{mk} - B_{mk} \cos\theta_{mk}) \\ P_n + P_n^f - P_{nL} = \\ \quad V_n \sum_{k=1}^R V_k (G_{nk} \cos\theta_{nk} + B_{nk} \sin\theta_{nk}) \\ Q_n + Q_n^f - Q_{nL} = \\ \quad V_n \sum_{k=1}^R V_k (G_{nk} \sin\theta_{nk} - B_{nk} \cos\theta_{nk}) \end{array} \right. \quad (26)$$

式中: P_m, Q_m, P_n, Q_n 为注入节点 m, n 的有功、无

有功功率; P_{mL} , Q_{mL} , P_{nL} , Q_{nL} 为节点 m, n 的有功、无功负荷。

4 算例验证

PEVR 是针对稀疏地区长距离输电造成线路压降过大情况而提出的调压装置,本文以配网电压等级为 10 kV,供电半径为 100 km 的线路作为算例参考背景,对 IEEE33 节点进行改进。IEEE33 节点基准电压为 12.66 kV,配网允许电压偏差范围为 $\pm 5\%$,PEVR 接入节点分别为节点 6、节点 13、节点 26,其另一接入点相当于作用于其相邻节点。根据其补偿特点可知,节点 6、节点 13、节点 26 为串联无功补偿,节点 7、节点 14、节点 27 为并联电压补偿。

PEVR 串联无功功率补偿给定值范围为 $[-2000, 2000]$ kvar,并联电压幅值补偿范围为基准电压的 $\pm 10\%$ 。

仿真系统示意图如图 5 所示,典型日负荷曲线图如图 6 所示。网络有功负荷最大值为 3 715 kW,无功负荷最大值为 2 300 kvar。

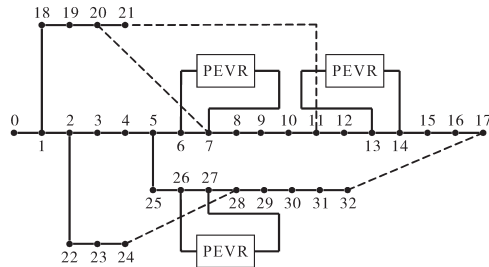


图5 改进 IEEE33 节点仿真系统示意图

Fig.5 The schematic of improved IEEE33 node simulation system

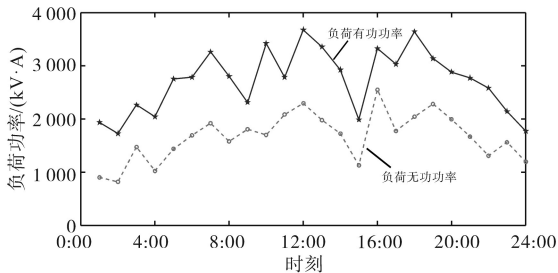


图6 日负荷曲线图

Fig.6 The daily load curves

PEVR 是可以实现连续控制的调压装置,为便于讨论,以 1 h 为时间间隔,对 4 h 内 PEVR 的补偿过程进行讨论,选取时间段为 18:00~21:00。首先,PSO 进行双层控制优化求解出 PEVR 的功率补偿,即 PEVR₁,PEVR₂,PEVR₃ 节点附加功率如表 1~表 3 所示。

表 1 PEVR₁ 节点附加功率

Tab.1 The additional power of PEVR₁ node

PEVR ₁	节点 6/(kV·A)	节点 7/(kV·A)
18:00	-1 956.7+j999.7	1 956.7+j1 324.3
19:00	1 566.0-j448.4	1 566.0+j1 968.3
20:00	1 991.4+j1 505.1	1 991.4+j121.4
21:00	-851.1+j650.1	851.1+j308.1

表 2 PEVR₂ 节点附加功率

Tab.2 The additional power of PEVR₂ node

PEVR ₂	节点 13/(kV·A)	节点 14/(kV·A)
18:00	1 900.6+j1 146.4	1 900.6+j1 973.4
19:00	969.5+j1 848.8	-969.5-j434.1
20:00	364.9+j289.3	-364.9+j844.0
21:00	453.3-j1 162.2	-453.3+j1 870.3

表 3 PEVR₃ 节点附加功率

Tab.3 The additional power of PEVR₃ node

PEVR ₃	节点 26/(kV·A)	节点 27/(kV·A)
18:00	-715.7+j903.3	715.7+j1 618.5
19:00	1 685.1+j115.0	1 685.1+j1 391.5
20:00	1 074.8+j545.5	1 074.8+j950.1
21:00	1 138.1+j465.1	1 138.1+j1 176.7

根据上述优化求解的附加功率,PEVR 并联侧无功功率给定值,串联侧 PEVR₁,PEVR₂,PEVR₃ 补偿电压幅值相角如表 4~表 6 所示。

表 4 PEVR₁ 补偿效果

Tab.4 PEVR₁ compensation effect

PEVR ₁	并联侧无功补偿给定/kvar	串联侧补偿电压	
		幅值/V	相角/(°)
18:00	1 698.23	468.36	0.68
19:00	1 998.23	479.22	-0.97
20:00	1 626.10	342.15	1.22
21:00	957.22	364.49	0.93

表 5 PEVR₂ 补偿效果

Tab.5 PEVR₂ compensation effect

PEVR ₂	并联侧无功补偿给定/kvar	串联侧补偿电压	
		幅值/V	相角/(°)
18:00	1 899.49	743.64	-0.077
19:00	1 397.00	433.23	-2.840
20:00	1 167.86	415.33	-1.250
21:00	784.59	541.38	-1.080

表 6 PEVR₃ 补偿效果

Tab.6 PEVR₃ compensation effect

PEVR ₃	并联侧无功补偿给定/kvar	串联侧补偿电压	
		幅值/V	相角/(°)
18:00	1 934.97	647.83	-0.430
19:00	1 584.82	506.04	0.035
20:00	1 549.04	400.90	0.082
21:00	1 707.98	429.25	-0.077

PEVR补偿前后电压曲线如图7所示。结合图7和IEEE33节点图可以看出,补偿前,位于线路末端的节点17、节点32由于线路长度过长,线路阻抗较大,因此电压压降较大,17节点电压为11.29 kV,32节点电压为10.65 kV,远低于允许电压偏差下限12.027 kV,因此需要通过PEVR对线路电压进行补偿。由图7可以看出,通过上述PEVR串并联侧控制补偿后,在18:00~21:00电压曲线中,包括线路末端节点电压都在12.027 kV以上,使各节点电压偏差都在 $\pm 5\%$ 内,延长了配网供电半径,保证了各节点电压质量。

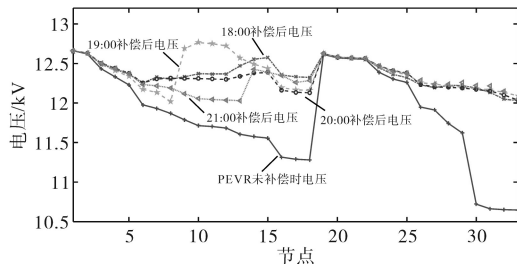


图7 节点电压曲线图

Fig. 7 The curves of nodal voltages

与传统调压方式相比,PEVR调节更为灵活多变。以可投切电容器为例,在PEVR接入的相同位置,在节点6、节点13、节点26分别投入4组200 kvar电容器,并以最大补偿程度投入,由图8可以看出,虽然在一定程度上电压得到有效补偿,但是末端节点电压改善不明显,从节点30开始便跌至11.06 kV,并且不可频繁投切,而PEVR不仅调节范围广,且可跟随系统负荷情况实现有功无功的连续调节。

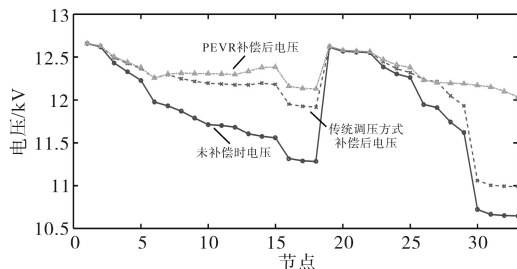


图8 传统调压方式与PEVR补偿后电压对比图

Fig. 8 Comparison of voltage after compensation between traditional voltage regulation and PEVR

对于长距离输电来说,线路上的有功网损是电能损耗主要形式,不仅造成能源浪费,还会带来较大的经济损失。

图9为PEVR补偿前后线路有功网损对比曲线图,当PEVR补偿后提高线路节点电压,有效减少线路有功网损,即减少了电能损耗,带来了一

定的经济效益。

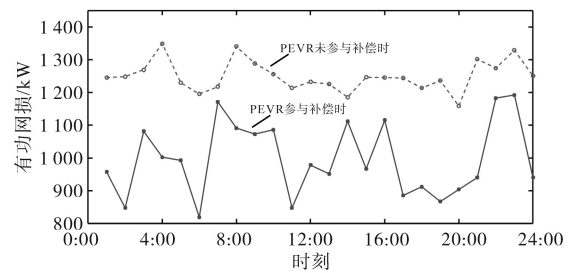


图9 有功网损对比曲线图

Fig.9 Comparison graph of active network loss

5 结论

本文针对稀疏地区长距离供电,线路压降大的问题,提出了基于PEVR调压的控制方式,使各节点电压都在电压偏差允许范围内运行,延长了中低压配网供电半径。由算例分析可知,PEVR通过PSO双层优化计算,对系统中接入的各个PEVR补偿量进行优化分配,根据串联侧补偿电压、并联侧无功补偿给定进行调节,并在满足电压要求的基础上减少了有功损耗,以及电压偏移量。通过PEVR调节后,各节点电压得到提升,并可维持在安全范围内运行。

相比于传统调压装置,PEVR的调节范围更广、速度更快、更灵活,本控制方式充分发挥了此优势,系统控制层做出判断后,通过优化计算立即响应,保证电压稳定性。由此可看出,相比于其他调压设备,PEVR更适用于稀疏地区的电压调节和偏远地区用户用电质量的提升,是延长配网供电半径的有效措施。

参考文献

- [1] 张江林,庄慧敏,刘俊勇,等.分布式储能系统参与调压的主动配电网两段式电压协调控制策略[J].电力自动化设备,2019,39(5):15-21,29.
Zhang Jianglin, Zhuang Huimin, Liu Junyong, et al. Two-stage voltage coordination control strategy for active distribution network with distributed energy storage system participating in voltage regulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5):15-21,29.
- [2] 刘斌,刘锋,梅生伟,等.考虑源网荷互动的虚拟发电厂分布式协同控制[J].电气传动,2019,72(3):72-77.
Liu Bin, Liu Feng, Mei Shengwei, et al. Distributed cooperative control for virtual power plants considering interaction of source, network and load[J]. Electric Drive, 2019, 72(3):72-77.
- [3] 王仲鸿,沈斐,吴铁铮.FACTS技术研究现状及其在中国的

- 应用与发展[J]. 电力系统自动化, 2000(23):1-5, 70.
Wang Zhonghong, Shen Fei, Wu Tiezheng. FACTS applications in China and its developing trends[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000(23):1-5, 70.
- [4] 刘国静, 祁万春, 黄俊辉, 等. 统一潮流控制器研究综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(12):78-86.
Liu Guojing, Qi Wanchun, Huang Junhui, *et al.* Review of researches on unified power flow controller[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(12):78-86.
- [5] 陈曦. UPFC提高电力系统电压稳定控制研究[D]. 南京:东南大学, 2016.
Chen Xi. Research on control of UPFC for enhancement of voltage stability[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [6] 周玲, 王宽, 钱科军, 等. 计及UPFC的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2008(4): 37-41.
Zhou Ling, Wang Kuan, Qian Kejun, *et al.* Power system reactive power optimization considering UPFC installation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008(4): 37-41.
- [7] 杨济如, 高赐威, 苏卫华. 能源互联网及优化运行调度简述[J]. 电力工程技术, 2019, 38(1): 49-55.
Yang Jiru, Gao Ciwei, Su Weihua. A brief review to the energy internet and its optimal scheduling[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(1): 49-55.
- [8] Duan Xianzhong, Chen Jinfu, Peng Feijin, *et al.* Power flow control with FACTS devices[C]//IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000.
- [9] 童强. 含FACTS元件的电力系统潮流计算模型与算法的研究[D]. 长沙:湖南大学, 2005.
Tong Qiang. Research on power flow calculation model and algorithm of power system with FACTS element[D]. Changsha: Hunan University, 2005.
- [10] 王树文, 纪延超, 马文川. 灵活交流输电技术[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007(3): 113-117, 121.
Wang Shuwen, Ji Yanchao, Ma Wenchuan. Survey of flexible AC transmission system technology[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007(3): 113-117, 121.
- [11] 王义红, 周勤勇, 卜广全, 等. FACTS和新型输电技术发展现状及在我国特高压电网中的应用前景研究[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(4):84-90.
Wang Yihong, Zhou Qinyong, Pu Guangquan, *et al.* Research on the development status of FACTS and new transmission technology and its application prospect in China's UHV power grid[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2013, 32(4):84-90.
- [12] 肖文静, 李杰, 王应芬, 等. 基于STATCOM的无功补偿策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(6):24-29.
Xiao Wenjing, Li Jie, Wang Yingfen, *et al.* Study on reactive power compensation strategy based on STATCOM[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(6):24-29.
- [13] 姬煜轲, 李春华, 赵晓斌, 等. 一种改进的STATCOM暂态无功控制策略[J]. 南方电网技术, 2019, 13(5):50-57.
Ji Yuke, Li Chunhua, Zhao Xiaobin, *et al.* An improved STATCOM transient reactive power control strategy[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(5):50-57.
- [14] 刘黎明, 康勇, 陈坚, 等. SSSC建模、控制策略及性能[J]. 电工技术学报, 2006(9):37-43.
Liu Liming, Kang Yong, Chen Jian, *et al.* Static synchronous series compensator: modeling, control scheme and performance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006(9):37-43.
- [15] 王忠诚. 输电线路静止同步串联补偿器(SSSC)的仿真研究[D]. 天津:河北工业大学, 2015.
Wang Zhongcheng. Simulation research on static synchronous series compensator (SSSC) in transmission lines[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.
- [16] 李国庆, 赵钰婷, 王利猛. 计及统一潮流控制器的可用输电能力的计算[J]. 中国电机工程学报, 2004(9):48-53.
Li Guoqing, Zhao Yuting, Wang Limeng. Available transfer capability calculation with unified power flow controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2004(9):48-53.
- [17] 王毅, 董毅峰, 侯俊贤, 等. 基于模块化功率注入模型的含UPFC电力系统潮流算法研究[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2537-2542.
Wang Yi, Dong Yifeng, Hou Junxian, *et al.* Research on power flow algorithm of power system with UPFC based on modular power injection model[J]. Power System Technology, 2017, 41(8):2537-2542.
- [18] 鲁裕婷, 赵天乐, 都洪基, 等. 基于改进粒子群算法的含DG配电网无功优化[J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 69-74.
Lu Yuting, Zhao Tianle, Du Hongji, *et al.* Reactive power optimization of distribution network with distributed generation based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6): 69-74.

收稿日期:2020-11-14

修改稿日期:2020-11-27