

偏远稀疏地区供电线路延伸的电力 电子调压器配置方法

赵建勇¹, 年珩¹, 陈文君², 董顺虎², 祁明录², 魏浩², 张震霄¹

(1. 浙江省电机系统智能控制与交流技术重点实验室(浙江大学电气工程学院), 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:为解决偏远稀疏地区配电网在运行中出现的经济性差、供电半径长、电压质量低等问题,首先采用一种基于电力电子调压器的有功无功和电压的补偿方法,实现供电半径延长和快速精准调整电压;其次,为合理配置电力电子调压器在配电网中的作用,进一步设计电力电子调压器选址定容的双层优化模型;然后,以优化模型上层考虑潮流灵敏度因子为主,电压稳定指标为辅,选出最佳安装位置,下层考虑电压稳定性和经济性确定最优安装容量。最后以基于偏远稀疏地区配电网改进的 IEEE 33 节点进行了算例验证,利用动态惯性权重粒子群算法求解模型最优值,优化结果证明了该配置方法的可行性和有效性。

关键词:电力电子调压器;双层优化;无功补偿;电压调节;选址定容

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.05.006 中图分类号:TM715 文章编号:1673-9140(2021)05-0041-09

Configuration method of power electronic voltage regulator for power supply line extension in sparse remote areas

ZHAO Jianyong¹, NIAN Heng¹, CHEN Wenjun², DONG Shunhu², QI Minglu²,
WEI Hao², ZHANG Zhenxiao²

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Electrical Machine Systems(College of Electrical Engineering, Zhejiang University), Hangzhou 310027, China; 2. Guoluo Power Supply Company, State Grid Qinghai Electric Power Company, Guoluo 814000, China)

Abstract: In order to solve the poor economy, long power supply radius, and low voltage quality problems in the operation of the distribution network in sparse and remote areas, a compensation method of active/reactive power and voltage based on power electronic voltage regulator is adopted to achieve the extension of power supply radius and adjust the voltage accurately and quickly. Then, in order to reasonably configure the role of power electronic voltage regulator in the distribution network, a bi-level optimization model for its location and capacity is designed. The upper layer of the optimization selects the best installation positions by considering the power flow sensitivity factor as the main factor and the voltage stability index as a supplement. The lower layer considers the voltage stability and e-

收稿日期:2020-08-29;修回日期:2020-11-20

基金项目:国网青海省电力公司科技项目(5228201900G5)

通信作者:赵建勇(1987-),男,博士研究生,中级,主要从事新能源发电技术及电气传动研究;E-mail:jyzhao@zju.edu.cn

onomy to determine the optimal installation capacity. Finally, an example is given based on the improved IEEE33 node of the distribution network in sparse and remote areas. The optimal value of the model is solved by utilizing the dynamic inertia weight particle swarm optimization algorithm. It is proven that the feasibility and effectiveness of the configuration method.

Key words: PEVR; bi-level optimization; reactive power compensation; voltage regulation; siting and sizing

随着现代电力系统规模不断地扩大,电力行业日益繁荣,人们对电能质量、电能的稳定性和经济性等方面提出了更高的要求^[1-2]。然而,一些偏远稀疏地区配电网仍存在着许多问题。稀疏地区地广人稀的特点使供电单元相对分散,而长距离供电半径导致线路电压损耗增大、电弧熄灭困难、电能质量低和经济性差。此外,较大的负荷波动会导致电压调整困难,常规的无功补偿无法满足运行要求。为解决偏远稀疏地区配电网面临的问题,可提高电压等级,增加电源点,但该类方法维护费用巨大,电网结构变化复杂。因此,通过增加各类电压补偿装置来延长稀疏地区配电网供电半径成为了近几年研究的热点^[3-5]。

目前,通过延长供电半径来提高电压质量的装置有很多。采用有载调压变压器进行调压,使电压偏移在合适的范围内,此方法是将主电网中的无功转嫁至缺额线路,使线路电压暂时提高,但是有可能导致系统电压崩溃,影响社会经济发展^[6];采用配置无功功率电源延长供电半径,通过补偿无功提高电压,如同步发电机、并联电容器和静止无功发生器等,并联电容器只能发出感性无功,成组投退,不可连续调节,同步发电机补偿范围受其本身运行极限约束,无法根据线路缺额补偿;采用静止无功补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)进行线路电压补偿,可以有效地产生无功电流,补偿系统的无功功率,维持节点电压,但对线路电压的补偿能力较弱。而静止同步串联补偿器(static synchronous series compensator, SSSC)虽然能够有效地补偿输电线路的电压,但对无功电流的补偿能力不强^[7-9];而现在又出现了统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)和统一电能质量控制器(unified power quality controller, UPQC)进行调节和补偿的方法,这两者拓扑结构类似,可以实

现电压的连续调节,并且除电压控制以外还能进行对潮流的控制,但 UPFC 应用场合大多为高压、特高压直流输电等主网建设,对于稀疏地区中低压配电网不太适用^[10];而 UPQC 则主要面向用户的电能质量问题,其复合了诸多治理电能质量问题的功能,考虑到偏远稀疏地区供电半径长,主要面向电压降落和节点功率控制的需求,UPQC 的电能质量治理功能不能得到充分应用。基于以上分析,该文采用一种适用于中压配电网调压的新型调压器—电力电子调压器(power electronic voltage regulator, PEVR),并针对电压波动及谐波设计对应的控制算法来解决偏远稀疏地区供电半径长、电压质量低等问题。PEVR 是一种结合了 SSSC 和 STATCOM 的装置,其精准、连续、迅速、高效的特点可以实现电压的快速调节,线路有功和无功的稳定补偿,提高了供电可靠性、可控性、运行性和电能质量^[11-13]。将其应用于偏远稀疏地区配电网进行无功补偿,可以在延长供电半径、快速精确调整电压、满足运行要求的同时保证经济性,解决目前配电网所面临的问题。

目前 PEVR 成本较高,配置容量过大,会造成不必要的经济浪费;但配置容量过小,又无法有效的调整电压,补偿无功。此外,PEVR 的安装位置也会影响稳定性。因此合理配置 PEVR 容量和安装位置能在保证经济性的同时更好的实现电压快速调节、线路有功和无功的稳定补偿。该文在考虑经济性、稳定性等各类指标的基础上,建立双层优化模型,上层指标以潮流灵敏度因子为主,电压稳定指标为辅选出最佳安装位置,下层考虑电压稳定性和经济性进行容量配置。最后以基于偏远稀疏地区配电网改进的 IEEE 33 节点为例,利用动态惯性权重粒子群算法求解模型最优值,验证该配置方法的可行性和有效性。

1 PEVR 数学模型

1.1 PEVR 工作原理

PEVR 基本结构如图 1 所示,PEVR 并联侧相当于一台 STATCOM 装置,串联侧相当于一台 SSSC 装置,两者分别通过耦合变压器 T_{ss} 和 T_{st} 与电网线路相连。并联侧经变压器 T_{st} 对 a 点电压进行整流,实现母线电容电压 U_{dc} 稳定,并根据需要提供无功补偿,为串联侧提供有功支持。串联侧通过控制输出电压 U_{eo} 实现 b 点电压调节,提供线路电压补偿。因此,PEVR 正常工作时,串并联侧分别等效为一个串联在线路中的可控电压源和并联在线路中的可控电流源,等效电路如图 2 所示。

图 2 中, U_{st} 、 δ_{st} 分别为 PEVR 并联侧电压幅值和相角; U_{ss} 、 δ_{ss} 分别为 PEVR 串联侧电压幅值和相角; I_i 、 I_{ss} 、 I_{st} 分别为节点 i 、串联支路和并联支路流过的电流; P_{st} 、 P_{ss} 为串并联侧流过的有功功率。由于 PEVR 自身不能产生有功功率,串联侧向系统提供的有功功率是由串并联侧逆变器之间耦合的直流电容输送,控制系统接收节点电压实时监测值,其补偿量由系统设置参考值与实际值的差值经串联侧内部控制环运算后输出补偿量,通过 U_{eo} 补偿电压

降落。PEVR 的并联侧通过无功指令计算出电流环 I_q^{ref} 的给定,通过电压电流双闭环控制生成并联侧逆变器的输出,实现无功功率的控制。

PEVR 内部损耗为零,内部功率平衡满足:

$$P_{st} + P_{ss} = 0 \tag{1}$$

$$I_i = I_{ss} + I_{st} \tag{2}$$

1.2 PEVR 等效功率注入模型

PEVR 接入系统补偿的无功功率变化量可通过相关联的节点电压判定。PEVR 接入电路后,将影响线路潮流,使后续潮流计算复杂。因此可根据电路基本原理,将节点注入功率等效处理以简便后续工作。等效功率注入模型如图 3 所示, ΔS_i 、 ΔS_j 分别为并联侧和串联侧对线路注入的功率。

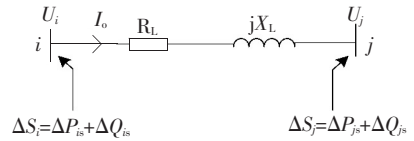


图 3 PEVR 等效功率注入模型

Figure 3 PEVR equivalent power injection model

PEVR 注入功率方程为

$$P_{is} = U_{ss}U_j [G_{ij} \cos(\delta_{ss} - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_{ss} - \delta_j)] - U_{ss}^2 G_{ij} - 2U_i U_{ss} G_{ij} \cos(\delta_{ss} - \delta_j) \tag{3}$$

$$Q_{is} = U_{ss}U_i [G_{ij} \sin(\delta_{ss} - \delta_j) + B_{ij} \cos(\delta_{ss} - \delta_j)] - U_i I_{st} \tag{4}$$

$$P_{js} = U_{ss}U_j [G_{ij} \cos(\delta_{ss} - \delta_j) - B_{ij} \sin(\delta_{ss} - \delta_j)] \tag{5}$$

$$Q_{js} = -U_{ss}U_i G_{ij} \sin(\delta_{ss} - \delta_j) - U_{ss}U_j B_{ij} \cos(\delta_{ss} - \delta_j) \tag{6}$$

式(3)~(6)中 P_{is} 、 Q_{is} 分别为 PEVR 在节点 i 处等效注入有功和无功; P_{js} 、 Q_{js} 分别为 PEVR 在节点 j 处等效注入有功和无功; G_{ij} 为节点 i 、 j 之间线路电导; B_{ij} 为节点 i 、 j 之间线路电纳。

2 PEVR 双层优化配置策略

对于 PEVR 优化配置研究,该文设计了双层优化模型。上层选址优化包括:确定 PEVR 安装个数 N ,计算各个线路安装 PEVR 后的潮流灵敏度因子 C_1^k 、 C_2^k ,选择绝对值前 N 个最大值所对应的线路,

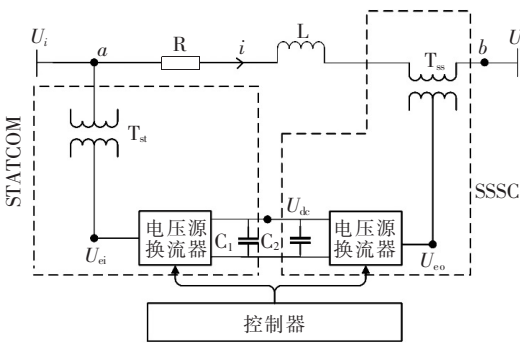


图 1 PEVR 基本结构

Figure 1 PEVR basic structure diagram

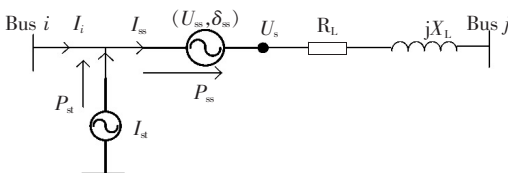


图 2 PEVR 等效电路

Figure 2 PEVR equivalent circuit

当 C_1^k 、 C_2^k 所选位置不一致时,考虑不同位置下的电压偏差减小率,以电压偏差减小率最大值对应的线路为最终安装地点;下层定容优化包括:在安装位置确定的前提下,以建设维护费用、输电能力提高收益和节点电压总偏差为评估指标,建立数学模型进行优化求解。整体优化配置框架如图4所示。

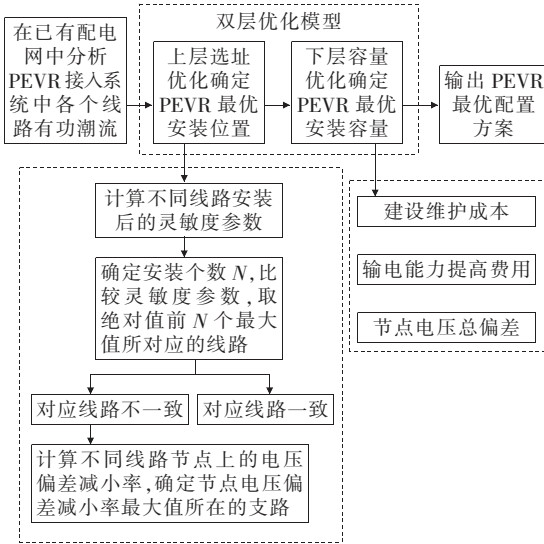


图4 选址定容优化框架

Figure 4 Framework of siting and sizing optimization

2.1 PEVR 选址优化数学模型

线路有功潮流性能指数可以体现系统正常或者紧急运行情况下的线路负载情况^[6]。其定义为

$$P_1 = \sum_{m=1}^N \frac{\omega_m}{2n} \left(\frac{P_{lm}}{P_{lm}^{\max}} \right)^2 \quad (7)$$

式中 P_1 为有功潮流性能指数; N 为系统的总支路数; p_{lm} 为支路 m 上的有功功率; p_{lm}^{\max} 为支路 m 的额定有功功率; ω_m 为反映支路重要性的权重系数; n 为指数系数。

PEVR 串联侧能够改变接入点电压 (U_{ss}, δ_{ss}) 改变线路潮流, 用 P_1 分别对 U_{ss}, δ_{ss} 求偏导得到 2 个灵敏度因子, 并利用灵敏度大小关系确定安装位置, 即

$$C_1^k = \frac{\partial P_1}{\partial U_{ss}} \Big|_{U_{ss}=0} \quad (8)$$

$$C_2^k = \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{ss}} \Big|_{\delta_{ss}=0} \quad (9)$$

式(8)、(9)中 C_1^k 、 C_2^k 为灵敏度因子, 表示 PEVR 对线路潮流的调节能力, 绝对值越大, 调节性能越好。

P_1 对 $X_k(U_{ss}, \delta_{ss})$ 的偏导为

$$\frac{\partial P_1}{\partial X_k(U_{ss}, \delta_{ss})} = \sum_{m=1}^N \omega_m p_{lm}^{2n-1} \left(\frac{1}{p_{lm}^{\max}} \right)^2 \cdot \frac{\partial p_{lm}}{\partial X_k(U_{ss}, \delta_{ss})} \quad (10)$$

$$\frac{\partial p_{lm}}{\partial X_k(U_{ss}, \delta_{ss})} = \frac{\partial p_{lm}}{\partial P_i} \cdot \frac{\partial P_i}{\partial X_k(U_{ss}, \delta_{ss})} + \frac{\partial p_{lm}}{\partial P_j} \cdot \frac{\partial P_j}{\partial X_k(U_{ss}, \delta_{ss})} \quad (11)$$

式(10)、(11)中 i, j 为支路 m 的始末节点。

该文采用文献[9]的直流潮流法求解潮流矩阵, 即

$$\Delta \theta = \mathbf{X} \cdot \Delta P \quad (12)$$

$$P_{ij} = \frac{\theta_i - \theta_j}{X_{ij}} \quad (13)$$

$$\mathbf{B}_{mn} = \frac{dP_{ij}}{dP_n} = \frac{1}{X_{ij}} \left(\frac{d\theta_i}{dP_n} - \frac{d\theta_j}{dP_n} \right) = \frac{X_{in} - X_{jn}}{X_{ij}} \quad (14)$$

式(12)~(14)中 m 为支路, 节点 i 流向节点 j ; n 为节点; \mathbf{B}_{mn} 为节点 n 注入附加功率后对支路 m 的影响矩阵; p_n 为节点 n 注入功率; X_{ij} 为支路 m 的电抗; X_{in}, X_{jn} 均为矩阵 \mathbf{X} 中对应元素。

支路 m 是否安装 PEVR, 将影响支路 m 有功功率 p_{lm} 的取值。考虑安装和不安装这 2 种情况, 可得有功功率为

$$P_{lm} = \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^{N_{\text{bus}}} \mathbf{B}_{mn} \cdot P_n + D_i P_{is} \quad (15)$$

式中 k 为平衡节点; D_i 为在配电网节点 i 中是否安装 PEVR, 安装取值为 1, 不安装取值为 0。

因此, 可进一步得到:

$$\frac{\partial p_{lm}}{\partial X_k(U_{ss}, \delta_{ss})} = \mathbf{B}_{mi} \cdot \frac{\partial P_{is}}{\partial X_k(U_{ss}, \delta_{ss})} + \mathbf{B}_{mj} \cdot \frac{\partial P_{js}}{\partial X_k(U_{ss}, \delta_{ss})} + D_i \cdot \frac{\partial P_{js}}{\partial X_k(U_{ss}, \delta_{ss})} \quad (16)$$

式中 $\mathbf{B}_{mi}, \mathbf{B}_{mj}$ 分别为节点 i, j 注入附加功率后对支路 m 的影响矩阵。

联立式(3)、(5), 即

$$\frac{\partial P_{is}}{\partial U_{ss}} \Big|_{U_{ss}=0} = U_i [G_{ij} \cos(\delta_{ss} - \delta_i) + B_{ij} \sin(\delta_{ss} - \delta_i)] - 2U_i G_{ij} \cos(\delta_{ss} - \delta_i) \quad (17)$$

$$\frac{\partial P_{is}}{\partial \delta_{ss}} \Big|_{\delta_{ss}=0} = U_i [G_{ij} \sin \delta_j + B_{ij} \cos \delta_j] - 2U_i G_{ij} \sin \delta_i \quad (18)$$

$$\frac{\partial P_{js}}{\partial U_{ss}} \Big|_{U_{ss}=0} = U_j G_{ij} \cos(\delta_{ss} - \delta_j) - U_j B_{ij} \sin(\delta_{ss} - \delta_j) \quad (19)$$

$$\frac{\partial P_{js}}{\partial \delta_{ss}} \Big|_{\delta_{ss}=0} = U_j [G_{ij} \sin \delta_j + B_{ij} \cos \delta_j] \quad (20)$$

假设安装 n 台 PEVR, 选择前 n 个绝对值大的 C_1^k, C_2^k , 其所对应的支路为 PEVR 安装位置, 若 2 个灵敏度因子所选择支路不同, 则需要进一步判断不同支路安装 PEVR 后的电压稳定性, 以电压偏差减少率为辅助判断依据, 选择该值最大时对应的支路为 PEVR 最终安装位置。

$$U_{\text{dev}i} = \left| \frac{U_i - U_i^{\text{ref}}}{U_i^{\text{max}} - U_i^{\text{min}}} \right| \quad (21)$$

$$\Delta U_{\text{dev}i} = \frac{U_{\text{dev}i1} - U_{\text{dev}i2}}{U_{\text{dev}i1}} \quad (22)$$

式(21)、(22)中 $U_{\text{dev}i}$ 为节点 i 的电压偏差, U_i^{ref} 为节点 i 电压的参考值; U_i 为节点 i 电压的实际值; $U_i^{\text{max}}, U_i^{\text{min}}$ 分别为节点电压允许的最大值和最小值, $\Delta U_{\text{dev}i}$ 为电压偏差减少率; $U_{\text{dev}i1}, U_{\text{dev}i2}$ 分别为安装前后的电压偏差, $\Delta U_{\text{dev}i}$ 越大, 安装 PEVR 后电压越稳定。

联立式(8)、(9)和(16)~(22), 可得灵敏度因子 C_1^k, C_2^k 。

2.2 PEVR 定容优化模型

PEVR 单位容量投资费用 C_0 (元/(kV·A)) 与容量 S (MV·A) 呈二次函数表达式, 即

$$C_0 = aS^2 + bS + c \quad (23)$$

$$C_1 = 800\beta C_0 \quad (24)$$

$$\beta = \frac{\tau(1+\tau)^y}{(1+\tau)^y + 1} \quad (25)$$

式(23)~(25)中 C_1 为 PEVR 等年值投资建设费用; β 为等年值系数; τ 为折旧率; y 为 PEVR 寿命年限。

PEVR 运行后, 效益主要来自提高系统输电能力方面, 根据电力系统中输电能力提高带来的效益原则, PEVR 运行后带来的效益为

$$C_2 = w(t) \cdot \Delta P \quad (26)$$

式中 $w(t)$ 为不同时间下的电价; ΔP 为安装 PEVR 后增加的有功功率。

因此, PEVR 总投资成本为

$$C = C_1 - C_2 \quad (27)$$

电压稳定性以节点电压总偏差为目标函数, 节点电压总偏差为

$$U_{\text{dev}} = \sum_i^N \left| \frac{V_i - V_i^{\text{ref}}}{V_i^{\text{max}} - V_i^{\text{min}}} \right| \quad (28)$$

PEVR 总投资成本以元为单位, 电压偏差无单位数值, 因此需要对 C 无量纲处理, 得无量纲处理后的总投资成本为

$$C' = \frac{C - C_{\text{min}}}{C_{\text{max}} - C_{\text{min}}} \quad (29)$$

式中 $C_{\text{max}}, C_{\text{min}}$ 分别为总投资成本最大值和最小值。

因此, PEVR 容量配置的数学模型为

$$f = C' + U_{\text{dev}} \quad (30)$$

3 粒子群算法

粒子群算法的基本思路是首先在可行解空间中初始化一群粒子, 每个粒子都代表优化问题的潜在最优解, 用位置、速度和适应度值表示粒子特性, 适应度值的大小代表粒子的优劣。粒子在可行范围内运动时, 通过判读自身位置、个体极值 (Pbest) 以及群体极值 (Gbest) 的距离, 不断更新自身的位置和速度。粒子每更新一次位置就计算一次适应度值, 通过比较新粒子适应度值、个体极值和群体极值, 更新个体极值和群体极值的位置, 依次不断迭代, 得到种群最优, 粒子群算法整体流程如图 5 所示^[14]。

但是, 基本粒子群算法在运算后期时, 因粒子多样性减少, 容易陷入局部最优, 且后期收敛速度变慢, 因此引入了惯性权重, 使惯性权重线性递减, 以此提高算法的收敛速度。在整个计算流程中, 惯性权重对粒子速度和位置的影响不同。惯性权重偏大

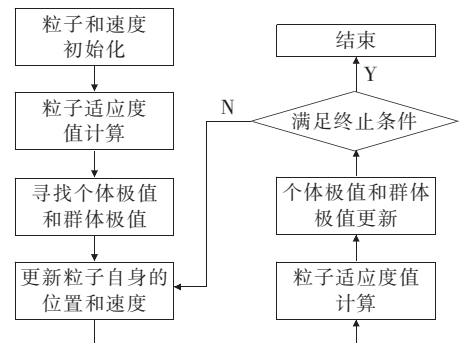


图5 算法流程

Figure 5 Flow chart of particle swarm optimization algorithm

时,算法全局搜索能力较强,对于局部搜索则较弱,这对一些偏差较少的区域难以准确的找到极值;当惯性权重偏小时,局部搜索能力会有提高,而对全局搜索就会变弱,这时粒子多样性就会减少而导致对新的区域难以搜索^[15-18]。

针对这一问题,对惯性权重进行自适应优化^[19-20]。常用惯性权重计算为

$$\omega(d) = \omega_s - (\omega_s - \omega_e) \left(\frac{d}{T_{\max}} \right) \quad (31)$$

$$\omega(d) = (\omega_s - \omega_e) \left(\frac{2d}{T_{\max}} - \left(\frac{d}{T_{\max}} \right)^2 \right) + \omega_s \quad (32)$$

$$\omega(d) = \omega_e \left(\frac{\omega_s}{\omega_e} \right)^{\frac{1}{1+10d/T_{\max}}} \quad (33)$$

式(31)~(33)中 ω_s 为初始惯性权重; ω_e 迭代次数最大时的惯性权重; d 为当前迭代次数; T_{\max} 为最大迭代次数。

改进的惯性权重计算式为

$$\omega(d) = a \left[\cos \left(\frac{d}{T_{\max}} \pi \right) + 1 \right] + b \quad (34)$$

式中 a 、 b 为辅助数,为调整 ω 在实际运算过程中取得合适范围。

利用三角函数周期性和“前凸后凹”性,使惯性权重满足运行前期利于全局搜索,运行后期利于局部搜索的条件。4种惯性权重变化曲线如图6所示。

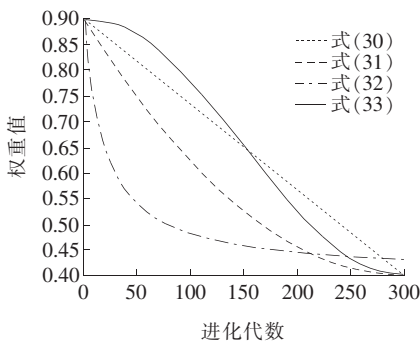


图6 4种惯性权重的变化

Figure 6 Changes in 4 inertia weight

由图6可知,式(33)较式(30)~(32),前期运行惯性权重大的同时后期运行惯性权重小,能很好的找寻全局最优解,且收敛速度快。

4 案例分析

该文采用改进的 IEEE 33 节点测试系统进行

仿真验证。其基准额定电压 $U_N = 12.66$ kV,符合中压配电网电压等级要求,其系统拓扑如图7所示,系统包含32条支路,5条联络开关,总负荷为 $3715 + j2300$ kVar,为模拟偏远稀疏地区配电网运行状况,以100 km供电半径为参考背景,对IEEE 33系统原有线路阻抗进行改变。单位容量计算二次函数表达式中, a 取值0.0014, b 取值1.818, c 取值1258.4, PEVR使用寿命35年,折旧率5%,假设PEVR安装台数为3台,在支路9和支路29各放置额定功率500 kW的发电机,考虑经济性,线路1、9和29不作为安装PEVR的选择。剩余支路灵敏度值见表1。

由表1可知, $|C_1^k|$ 前3位最大值对应的线路为支路10、30、3,分别为8.013、7.793和7.975。 $|C_2^k|$ 前3位最大值对应的线路为支路12、30、3,分别为21.023、19.332和18.435。因此确定支路30和支路3安装PEVR。对于PEVR安装至支路10或12,需通过 ΔU_{devi} 辅助判断。节点9、10、11、12的电压偏差减小率见表2。

由表2可知,节点11和节点12在PEVR安装后较安装前电压偏差减小,所以PEVR安装在支路12的电压稳定性优于支路10,所以PEVR最终安装位置为支路3、12、30。

PEVR容量配置优化结果见表3。IEEE 33节点电压偏差如图7所示。当支路3、12、30分别安装容量为37.271、48.382、42.596 MV·A的PEVR时,在电压稳定的同时保证经济的合理性,此时容量配置结果最优。在最优配置下的节点电压偏差如图8所示。

由图8可知,在支路9和29安装发电机,可以提高电压稳定性,但仍存在部分节点电压较低,电压偏差较大的情况。安装PEVR后,各节点电压得到明显提升,电压偏差明显减小,且均在电压偏差允许范围内。

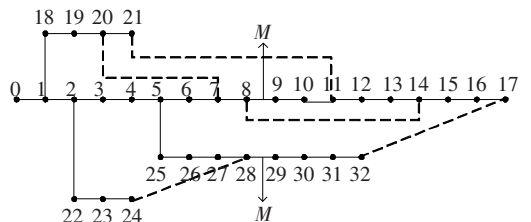


图7 IEEE 33节点系统

Figure 7 IEEE 33 node system

表 1 各线路灵敏度参数值

Table 1 Sensitivity parameter value of each line

支路	首末节点	C_1^k	C_2^k
1	0-1	—	—
2	1-2	-6.377	-3.283
3	2-3	-7.975	-18.435
4	3-4	-6.833	-4.289
5	4-5	-5.754	8.502
6	5-6	-5.093	3.542
7	6-7	3.215	-1.930
8	7-8	1.974	3.280
9	8-9	—	—
10	9-10	-8.013	-18.423
11	10-11	-6.892	-18.304
12	11-12	-6.023	-21.023
13	12-13	-5.037	-15.239
14	13-14	-3.519	-13.959
15	14-15	-2.233	-9.452
16	15-16	3.378	6.397
17	16-17	1.327	5.342
18	1-18	-5.572	-13.205
19	18-19	-3.907	-4.342
20	19-20	3.469	-4.533
21	20-21	2.037	-3.291
22	2-22	-5.921	15.289
23	22-23	-5.002	10.392
24	23-24	-3.992	7.453
25	5-25	-2.863	5.356
26	25-26	-2.013	-3.563
27	26-27	4.046	8.391
28	27-28	2.874	-5.458
29	28-29	—	—
30	29-30	-7.793	-19.332
31	30-31	-5.679	-13.239
32	31-32	-4.352	-9.450

表 2 电压偏差减小率

Table 2 Voltage deviation reduction rate

节点	ΔU_{devi}	节点	ΔU_{devi}
9	0.762	11	0.917
10	0.825	12	0.873

表 3 PEVR 安装容量

Table 3 PEVR installation capacity

支路	容量/ (MV·A)	总投资成本/ 万元	节点电压 总偏差/%
3	37.271		
12	48.382	3 827.57	2.214 1
30	42.596		

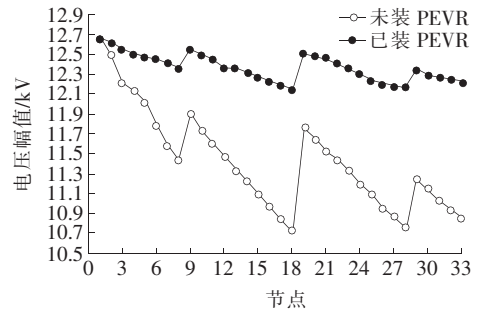


图 8 节点电压偏差

Figure 8 Node voltage deviation

5 结语

为解决偏远稀疏地区配电网在运行中出现的一系列问题,该文采用一种适用于中压配电网的新型调压器—电力电子调压器来实现快速精准调整电压,延长稀疏地区配电网供电半径。同时,为合理配置电力电子调压器的容量和位置,提出了一种电力电子调压器的双层优化配置方法。

双层优化配置模型中,上层优化模型主要考虑以潮流灵敏度为主,并辅以电压稳定指标选出最佳安装位置,当 2 个潮流灵敏度因子选择出的安装支路不同时,通过计算各个支路的电压偏差减小率确定最终安装位置;下层优化模型考虑电压稳定性和经济性确定最优安装容量。该文以基于偏远稀疏地区配电网改进的 IEEE 33 节点为例,利用设计的双层优化配置模型进行了电力电子调压器的选址定容计算。仿真结果表明该数学模型能够在经济性和稳定性的基础上,确定 PEVR 最优安装位置和容量,配置方案能够延长稀疏地区配电网供电半径,提高了电压稳定性和经济性。优化结果证明了该配置方法的可行性和有效性。

参考文献:

[1] 于会群,张晓丹,李增峰,等. 基于电能质量等级的孤岛

- 微电网分层控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(6):68-75.
- YU Huiqun, ZHANG Xiaodan, LI Zengfeng, et al. Research on hierarchical control strategy of island microgrid based on power quality grades[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(6):68-75.
- [2] 李娟, 费洋. 基于改进多目标万有引力算法的 UPFC 选址定容[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(3):76-83.
- LI Juan, FEI Yang. Site selection and determination of capacity for UPFC based on improved multi-objective gravitationa[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(3):76-83.
- [3] 阴晓晴, 易皓, 杨泽斌, 等. 基于 SAPF 的电网多节点电压谐波优化补偿方法[J]. 中国电力, 2021, 54(8):2-10.
- YIN Xiaqing, YI Hao, YANG Zebin, et al. Optimal compensation method for multi-node voltage harmonics based on SAPF[J]. Electric Power, 2021, 54(8):2-10.
- [4] 梁华彬, 王健, 杜兆斌. 基于紧急需求响应的主动配电网电压协调控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(2):70-76.
- LIANG Huabin, WANG Jian, DU Zhaobin. Coordinated voltage control strategy of active distribution network based on emergency demand response[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(2):70-76.
- [5] 郭艳飞, 任雪桂, 鞠力, 等. 基于层次分析法的综合能源系统能效评估方法研究及应用[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(4):121-128.
- GUO Yanfei, REN Xuegui, JU Li, et al. The comprehensive efficiency evaluation method for integrated energy system based on AHP[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(4):121-128.
- [6] 司丞坤, 高金峰. 有载调压变压器对电力系统电压稳定的影响分析[J]. 电测与仪表, 2015, 52(20):113-119.
- SI Chengkun, GAO Jinfeng. Analysis on the effect of on-load tap changer on the voltage stability of power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(20):113-119.
- [7] 张前进, 周林, 李海啸, 等. 考虑 SVG 补偿装置的大型光伏并网系统振荡分析与抑制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9):2636-2643.
- ZHANG Qianjin, ZHOU Lin, LI Haixiao, et al. Oscillation analysis and suppression of large-scale grid-connected photovoltaic system considering SVG equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9):2636-2643.
- [8] 欧阳晨, 卫志农, 孙国强. 基于树木生长算法的含 UPFC 的最优潮流计算[J]. 电力工程技术, 2020, 39(3):84-91.
- OUYANG Chen, WEI Zhinong, SUN Guoqiang. Optimal power flow with UPFC based on tree growth algorithm [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(3):84-91.
- [9] 和萍, 申润杰, 祁盼, 等. 四种 FACTS 装置对改善风光互补系统稳定性的研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(7):65-72.
- HE Ping, SHEN Runjie, QI Pan, et al. Four kinds of FACTS devices to improve the stability of wind-solar compensation system[J]. Smart Power, 2020, 48(7):65-72.
- [10] 游广增, 杨健, 李玲芳, 等. UPFC 在提高地区电网风电送出能力中的应用[J]. 高压电器, 2019, 55(10):224-231.
- YOU Guangzeng, YANG Jian, LI Lingfang, et al. Application of unified power flow controller to wind power transmission capacity enhancement of regional power grid[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10):224-231.
- [11] 王成福, 梁军, 张利, 等. 风电场混合无功功率补偿系统及其控制策略研究[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14):43-124.
- WANG Chengfu, LIANG Jun, ZHANG Li, et al. Hybrid reactive power compensation system and its control strategy for wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14):43-124.
- [12] Chaudhari B N, Fernandes B G. Performance of line start permanent magnet synchronous motor with single-phase supply system[J]. IEEE Proceedings Elec-

- tric Power Applications, 2004, 151(1): 83-90.
- [13] 周羽生, 周有庆, 戴正志. 基于 FTU 的配电网故障区段判断算法[J]. 电力自动化设备, 2000, 20(4): 25-27.
ZHOU Yusheng, ZHOU Youqing, DAI Zhengzhi. Algorithm for fault section judgement in power distribution network based on FTU[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(4): 25-27.
- [14] 郁垒, 史峰, 王辉, 等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015: 137-161.
- [15] 曹生让, 丁晓群, 王庆燕, 等. 基于反向云自适应粒子群算法的多目标无功优化[J]. 中国电力, 2018, 5(17): 21-27.
CAO Shengrang, DING Xiaqun, WANG Qingyan, et al. Multi-objective reactive power optimization based on opposition-based learning cloud model adaptive particle swarm optimization[J]. Electric Power, 2018, 5(17): 21-27.
- [16] 孙淑琴, 吴晨悦, 颜文丽, 等. 基于随机衰减因子粒子群的最优潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 43-52.
SUN Shuqin, WU Chenyue, YAN Wenli, et al. Optimal power flow calculation method based on random attenuation factor particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 43-52.
- [17] 陆立民, 褚国伟, 张涛, 等. 基于改进多目标粒子群算法的微电网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 116-124.
LU Limin, CHU Guowei, ZHANG Tao. Optimal configuration of energy storage in microgrid based on improved multi-objective particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 116-124.
- [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.
- [19] 胡堂清, 张旭秀, 曹晓月. 一种动态调整惯性权重的混合粒子群算法[J]. 电光与控制, 2020, 13(4): 24-28.
HU Tangqing, ZHANG Xuxiu, CAO Xiaoyue. A hybrid particle swarm optimization with dynamic adjustment of inertial weight[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 13(4): 24-28.
- [20] 孟荣, 赵冀宁, 周通. 基于改进惯性权重粒子群算法的抢修小组快速调配策略[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(7): 17-24.
MENG Rong, ZHAO Jining, ZHOU Tong. Rapid deployment strategy of emergency repair team based on improved inertial weighed PSO[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(7): 17-24.