

基于改进禁忌搜索算法的馈线双向自动调压器安装位置优化

针对多水电边远山区配电网的季节性电压质量问题,在不改变电网结构的前提下,可通过安装馈线双向自动调压器(Bidirectional Step Voltage Regulator, BSVR)实现电压的优化控制。建立了配电网有功网损最小、电压平均偏差最小以及投资成本最小的多目标优化模型,采用权重系数将多目标优化问题转化为归一化单目标优化问题,利用改进禁忌搜索算法确定了BSVR的最佳安装位置。算例结果表明,该优化方法能有效改善多水电边远山区配电网电压质量、降低网损,具有可行性和实用性。

彭显刚¹ 林利祥¹ 姚 鹏² 林卓琼¹ 刘 艺¹/1.广东工业大学自动化学院
2.广东电网公司计划发展部



彭显刚/副教授

关键词/Keywords

配电网·
小水电·
馈线双向自动调压器·
改进禁忌搜索·
安装位置·

多水电边远山区10 kV配电线路普遍存在电压丰水期偏高而枯水期偏低的问题,严重影响了用户端电压质量^[1]。由于受限于建设资金与投资效益等因素,不可能对此电网结构进行大规模改造。

近年来,馈线自动调压器被广泛应用于中压配电线路中,特别是馈线双向自动调压器(Bidirectional Step Voltage Regulator, BSVR),它通过自动识别潮流方向跟踪电压变化,由智能控制器调节有载分接开关实现双向调压。该设备能在投资较小的情况下,迅速有效地改善边远地区电压质量。文献[2]介绍了BSVR在改善浙江多水电地区电压质量的重要作用,但该文没有讨论BSVR安装位置的选取方法;文献[3]具体介绍了自动调压器的原理与应用,但在选取安装位置时,仅凭经验值确定为线路的1/2

或2/3处,而没有考虑线路的实际负荷分布;文献[4]通过采集电压数据,选择低电压用户集中且分支线较长的地方作为安装点,同样没有很好地解决调压器安装位置的优化问题。针对以上不足,本文提出了一种基于改进禁忌搜索算法的BSVR安装位置优化方法,并以广东某地区电网数据为支撑,论证了该方法在提高电压质量和经济效益上的可行性与实用性。

数学模型

1. 目标函数

本文综合考虑了有功网损最小、电压平均偏差最小和设备投资成本最小三个优化目标,并将多目标函数加权处理形成归一化的单目标函数。

1) 有功网损为

$$f_1 = P_{\text{loss}} = \sum_{k=1}^{N_k} G_k (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij}) \quad (1)$$

式中, U_i 、 U_j 为节点 i 、 j 的电压幅值; $\cos \theta_{ij}$ 为节点 i 、 j 之间的角度差; G_k 为支路 k 的电导。

2) 电压平均偏差为

$$f_2 = V_{\text{dev}} = \left(\sum_{i=1}^N |U_i - U_{Ni}| \right) / n \quad (2)$$

式中, U_i 为节点 i 的电压幅值; U_{Ni} 为节点 i 的额定电压; n 为节点数。

3) 设备投资成本是以BSVR的额定容量为安装点以后配电变压器容量总和的1.1~1.3倍。在不同安装点,设备型号可能不同,因此投资成本会有差异。山区线路的配电变压器总容量一般小于

广东电网公司2013年重点规划项目资助(030900Q000130003)。

5 000 kV·A, 此处 S 最大值取5 000 kV·A。BSVR投资成本为

$$f_3 = C_{\text{inv}} = \begin{cases} 25 & S \leq 2\,000 \text{ kV} \cdot \text{A} \\ 28 & 2\,000 \text{ kV} \cdot \text{A} < S \leq 3\,000 \text{ kV} \cdot \text{A} \\ 40 & 3\,000 \text{ kV} \cdot \text{A} < S \leq 5\,000 \text{ kV} \cdot \text{A} \end{cases} \quad (3)$$

式中, C_{inv} 为设备成本, 可根据市场价格作调整, 万元; S 为安装点以后配电变压器容量总和的1.2倍。

4) 归一化目标函数

使各个目标函数都达到最优的解是不存在的, 可行解通常是满足约束条件而相对于不同目标互有优劣^[5]。此外, 不同目标函数因量纲不同也无法比较。为解决此类多目标优化问题, 本文采用将多个指标进行归一化合并再加权的方式进行处理^[6], 得到最终的目标函数为

$$\min F = \lambda_1 f_1^* + \lambda_2 f_2^* + \lambda_3 f_3^* \quad (4)$$

式中, $f_1^* = (P_{\text{loss}} - P_{\text{lossmin}})/(P_{\text{lossmax}} - P_{\text{lossmin}})$; $f_2^* = (V_{\text{dev}} - V_{\text{devmin}})/(V_{\text{devmax}} - V_{\text{devmin}})$; $f_3^* = (C_{\text{inv}} - C_{\text{invmin}})/(C_{\text{invmax}} - C_{\text{invmin}})$; λ_1 、 λ_2 和 λ_3 分别为三个指标的权重系数, $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$ 。本文侧重提高电压质量, 因此电压偏差指标权重 λ_2 取0.5, λ_1 、 λ_3 分别取0.3和0.2。

2. 约束条件

节点电压幅值约束为

$$U_{\text{imin}} \leq U_i \leq U_{\text{imax}} \quad (5)$$

BSVR电压比约束为

$$T_{\text{imin}} \leq T_i \leq T_{\text{imax}} \quad (6)$$

功率约束方程为

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (7)$$

式中, U_{imin} 、 U_{imax} 分别为电压幅值允许的下限和上限; T_{imin} 、 T_{imax} 分别为BSVR的最小和最大电压比; P_i 、 Q_i 分别为复合节点到发电机节点的注入有功功率和无功功率; B_{ij} 为节点 i 、 j 之间的节点导纳矩阵元素的虚部。

多小水电地区配电线路枯大期和丰小期的负荷差异较大, 因此本文选取枯大(枯水期最大负荷)时刻作为枯水期典型时刻, 以丰小(小水电最大发且小负荷)时刻作为丰水期典型时刻, 即主要是求得线路极端运行方式的最优规划。对于

非极端运行方式, BSVR可通过自动改变电压比确保各节点电压的合格。

3. 含分布式电源配电网潮流计算

小水电等分布式电源接入配电网, 使潮流大小和方向都发生改变^[7], 传统的潮流算法已不能满足含分布式发电系统的需求^[8]。为此, 文献[9]提出一种基于回路分析法的三相弱环配电网潮流的改进算法; 文献[10]提出了利用稀疏网络层次矩阵实现矩阵式前推回代的快速直接算法; 文献[11]建立了分布式电源及BSVR的潮流计算模型, 对传统前推回代算法作出改进, 形成了含分布式电源配电网潮流计算方法。本文主要采用文献[11]介绍的方法进行潮流计算。

基于改进禁忌搜索算法的BSVR安装位置优化

近年来, 如模拟退火(SA)算法、遗传(GA)算法和禁忌搜索(TS)算法等“现代启发式”全局搜索寻优技术各个领域得到了广泛的应用^[12]。其中, SA算法和GA算法在设置优化参数时受主观因素影响较大, 且收敛速度较慢。而TS算法效率较高^[13-14], 它具有以下主要特点^[15]: ①具有灵活的特赦准则, 在一定程度上能够接受劣解, 从而在搜索过程中跳出局部最优解; ②新解在当前最优解或非禁忌最优解中产生, 大大提高获取全局最优的概率。TS算法的缺点是对初值要求高, 初值的选取会直接影响搜索效率^[16], 本文在利用此算法优化BSVR安装位置时, 选取工程上BSVR的经验安装点为初值, 可很好地弥补这一缺点。

1. 解的构成

求解最优解时除了保证节点电压合格和网损最小外, 为了给日后负荷或发电量增长留有调压的空间, 还应避免BSVR在工作时处于最大电压比。因此, 算法的解相量除了安装位置外, 还考虑了BSVR的电压比, 即

$$X = [N_i, T_k] \quad (9)$$

式中, N_i 为节点编号; T_k 为BSVR电压比。

2. 邻域搜索

BSVR的安装位置和调压电压比是一个组合优化

问题, 本文阐述两种邻域搜索策略。在基本邻域搜索方法基础上扩大搜索范围从而得到全局最优解。

(1) 安装位置的邻域搜索

以主干线上相邻节点进行邻域搜索, 作为BSVR的安装位置, 并依次计算适配值函数。

(2) 调压电压比的邻域搜索

传统的邻域搜索是选取固定步长作为邻域, 为了避免该方法的局限性, 本文对TS算法做出改进, 根据BSVR电压比离散性的特点, 选取BSVR的标称电压比构成数组, 将其作为电压比的邻域, 从而提高了邻域搜索的效率。BSVR有7档或9档两种调压电压比, 本文仿真时选取9档调压器, 算法的邻域为 $T=[0.8, 0.85, 0.9, 0.95, 1.0, 1.05, 1.1, 1.15, 1.2]$ 。

3. 初始解和藐视准则

以BSVR在工程上的经验安装位置和工作电压

比作为初始解。为了防止遗失优良解, 采用全局形式的藐视准则。

4. 禁忌对象和禁忌长度

本文的禁忌对象是发生变化后的状态分量, 即记录当前解和候选解中发生变化的分量, 将其作为禁忌对象放入禁忌表中。

禁忌长度反映了算法“爬山”的能力。禁忌长度越长, “爬山”能力越强; 但禁忌长度太长, 会增长收敛时间。对于规模较小且网格化程度较弱的配电网, 禁忌长度一般可取 $3 \sim 5^{[13]}$, 本文选取禁忌长度为4。

5. 终止准则

终止准则设为最佳适配值保持连续若干次不变。

6. 程序流程图

采用TS算法获得BSVR最佳安装位置的程序流程图如图1所示。

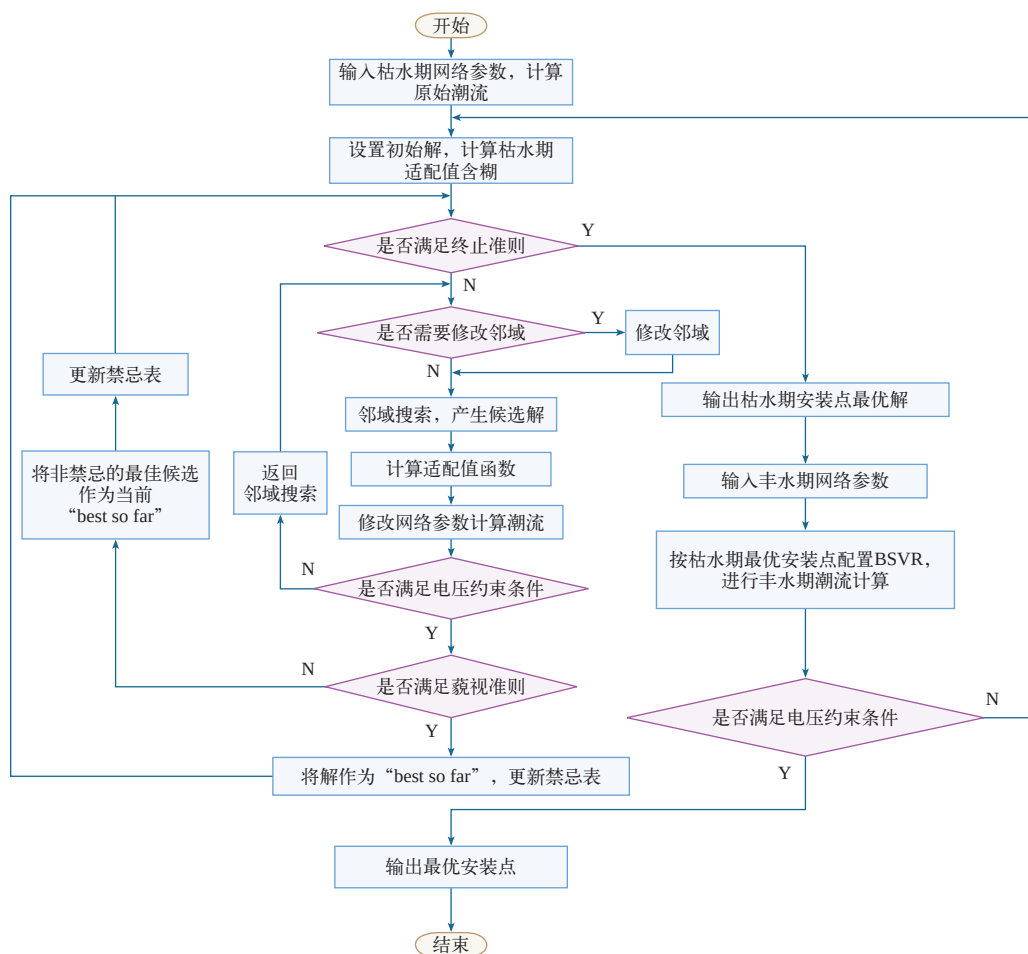


图1 优化算法流程图

算例分析

应用上述方法编制的计算程序,对某电网某实际配电线路仿真分析。

1. 线路基本情况

该线路主干线长度为18.38 km,线型为LGJ-70;接入配电变压器44台,总容量4875 kV·A;年最大电流为205 A;该线路中部及末端分布10座水电站,装机容量2 735 kW。其网络拓扑图如图2所示。

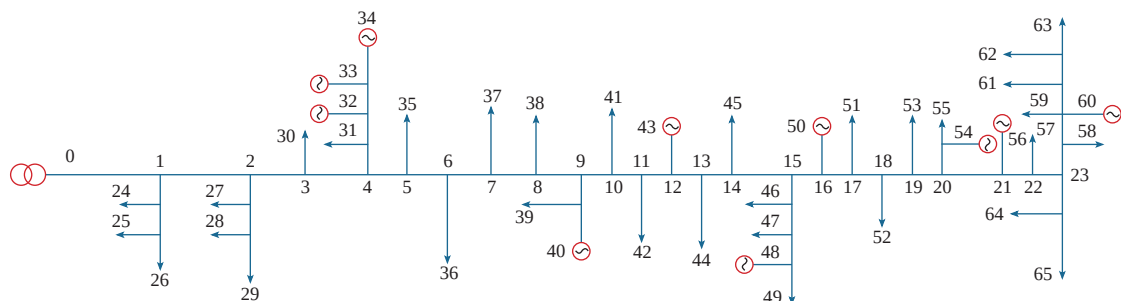


图2 配电线路网络拓扑图

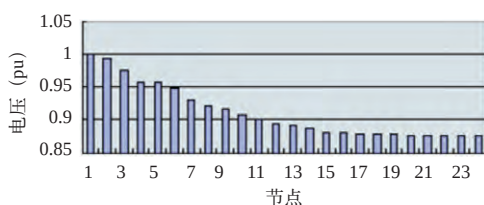


图3 枯水期原始节点电压

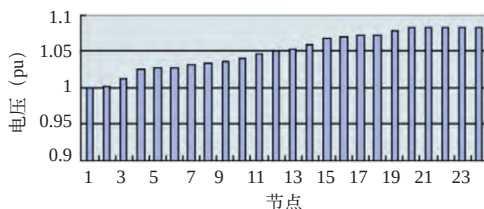


图4 丰水期原始节点电压

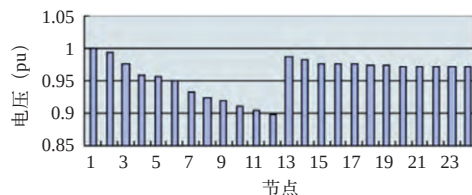


图5 枯水期优化前电压

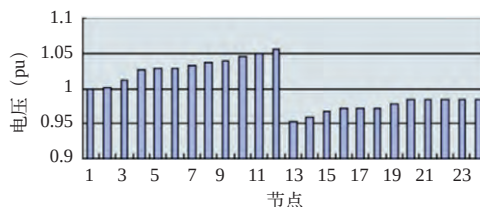


图6 丰水期优化前电压

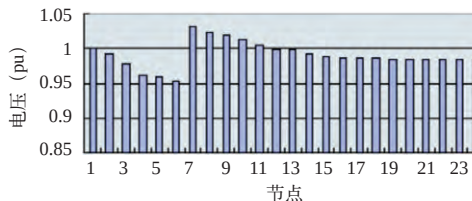


图7 枯水期优化后电压

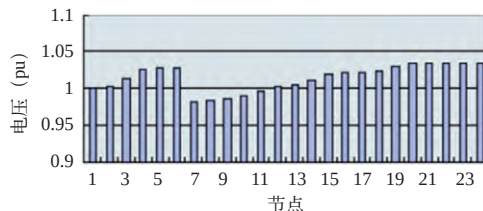


图8 丰水期优化后电压

2. 初始潮流计算

利用该线路枯水期、丰水期某时刻的数据,计算潮流结果:枯水期最高电压为1.00 (pu),最低电压为 0.88 (pu),有46个节点电压幅值低于0.93 (pu),电压合格率为28.79%;丰水期最低电压为1 (pu),最高电压为1.09 (pu),有29个节点电压幅值高于1.07 (pu),电压合格率为56.06%。该结果与该电网实际运行资料相符。线路主干线初始节点电压如图3、图4所示。

3. BSVR安装位置优化

1) 按工程经验值选取线路2/3处(即第12个节点)作为BSVR安装位置,由潮流计算得调压后枯、丰水期主干线节点电压分别如图5、图6所示。

2) 应用优化算法确定安装点。选取经验值节点12为初始值,优化结果显示最优解 $X_{best}=6$,即第6个节点是最优安装位置,仿真时间为2.21 s。优化后枯、丰水期主干线节点电压分别如图7、图8所示。

4. 仿真结果分析

(1) 电压调节效果

采用经验值作为BSVR安装位置，调压后电网主要数据结果：枯水期最高电压/最低电压1.000/0.896 (pu)，线路仍有12个节点电压不合格，电压合格率为81.82%；丰水期最高电压/最低电压1.062/0.952 (pu)，66个节点电压均合格。

采用改进TS算法优化安装位置，调压后电网主要数据结果：枯水期最高电压/最低电压1.033/0.952 (pu)，全线66个节点电压均合格，电压合格率为100%；丰水期最高电压/最低电压1.061/0.984 (pu)，电压合格率也为100%，且线路处于更稳定的电压运行状态。

由此可见，经过优化后，线路电压质量得到明显的改善。优化前后部分节点电压值如表1所示。

表1 线路优化前后部分节点电压值

时间	类别	电压合格 率 (%)	0 (pu)	17 (pu)	38 (pu)	42 (pu)	65 (pu)
枯水期	未调压	28.79	1.000	0.879	0.914	0.892	0.875
	经验位置	81.82	1.000	0.975	0.917	0.896	0.971
	调压						
	最佳位置	100	1.000	0.985	1.018	0.988	0.983
丰水期	未调压	56.06	1.000	1.072	1.083	1.051	1.083
	经验位置	100	1.000	0.966	1.039	1.056	0.985
	调压						
	优化位置	100	1.000	1.023	0.986	1.001	1.014

(2) 经济效益分析

程序运行的结果表明该线路安装BSVR前，枯水期有功损耗为206.35 kW，线损率为6.30%。优化后该线有功损耗为169.93 kW，线损率为5.18%，其数据对比如表2所示。

表2 枯水期BSVR优化前后经济效益对比

类别	有功网损/kW	线损率 (%)
未安装BSVR	206.35	6.30
经验值处安装BSVR	191.48	5.84
最优解处安装BSVR	169.93	5.18

由表2可知，按经验值安装BSVR调压后有功损耗为191.48 kW，线损率为5.84%；而采用TS算

法优化后，线路的有功损耗仅为169.93 kW，线损率为5.18%，计算可得优化后有功损耗降低了11.25%，线损率降低了11.30%，从而获得更高的经济效益。此外，在最优解位置安装BSVR后，全线有功损耗比安装前降低了17.65%，线损率降低了17.77%，节能降损效果显著。

结束语

1) 建立了面向多水电边远山区配电线路的全局邻域搜索策略和藐视准则，采用改进TS算法确定了BSVR最佳安装位置。该算法具有较强的“爬山”搜索能力，但对初始解的依赖性较强，在应用时需要根据配电线路的实际情况合理选择初始解。

2) 通过数学建模并对实际算例进行测试和验证，结果证明将改进TS算法应用在含分布式电源配电线路调压器安装位置优化上是可行的。

3) 对多水电边远山区配电线路，可采用BSVR改善电压质量，但在过载或接近重载且负荷增长较快的线路不建议安装。

参考文献

- [1] 王海鹏, 袁荣湘, 范群英, 等. 小水电集中上网地区无功电压影响与分析 [J]. 中国农村水利水电, 2010 (5): 155-157.
- [2] 林旭义, 黄伟君. 含小水电的10kV线路电压质量改善新途径 [J]. 浙江电力, 2010 (2): 59-61.
- [3] 郑建华, 张庆磊, 王宝华. 馈线自动调压器设计方法研究 [J]. 电子设计工程, 2012, 20 (24): 162-164.
- [4] 于晓牧, 王继峰, 翟晓凡, 等. 中压线路调压器的应用 [J]. 农村电气化, 2011 (1): 11-12.
- [5] 刘述奎, 李奇, 陈维荣, 等. 改进粒子群优化算法在电力系统多目标无功优化中应用 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29 (11): 31-36.
- [6] 魏希文, 邱晓燕, 李兴源, 等. 含风电场的电网多目标无功优化 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (17): 107-111.
- [7] 崔弘, 夏成军, 罗宗杰, 等. 分布式电源并网对

- 配网系统的影响 [J]. 电气应用, 2009, 28 (24): 54-58.
- [8] 王守相, 黄丽娟, 王成山, 等. 分布式发电系统不平衡三相潮流计算 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (8): 11-15.
- [9] 李红伟, 张安安. 含 PV 型分布式电源的弱环配电网三相潮流计算 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (4): 128-135.
- [10] 王建勋, 吕群芳, 刘会金, 等. 含分布式电源的配电网潮流快速直接算法 [J]. 电力自动化设备, 2011, 31 (2): 17-21.
- [11] 刘庆珍, 蔡金锭. 计及电压调节和分布式电源的配电网潮流分析 [J]. 电工电能新技术, 2010, 29 (4): 14-17.
- [12] 李益华, 林文南, 李茂军. 基于改进Tabu搜索算法的区域电网无功优化 [J]. 高电压技术, 2008, 34 (7): 61-64.
- [13] 任晓莉, 程红丽, 刘健. 基于禁忌搜索算法的变电站电压无功优化控制 [J]. 继电器, 2008, 36 (8): 31-34.
- [14] 叶品勇, 都洪基. 改进Tabu搜索方法在无功优化中的应用 [J]. 电气应用, 2007, 26 (2): 32-36.
- [15] 向小蓉, 刘涤尘, 向农, 等. 基于并行禁忌搜索算法的配电网重构 [J]. 电网技术, 2012, 36 (8): 100-105.
- [16] 陈道君, 龚庆武, 张茂林, 等. 考虑能源环境效益的含风电场多目标优化调度 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (13): 10-17.
- (收稿日期: 2014-08-18) EA

先进照明灯具
寿命长、节能、环保

集成式遥测系统
时时监控系统状态

该系统具有防护等级高、抗震
抗冲击、节能环保、应用温度
范围广泛的特点

预制式零部件
节省安装、维护时间与成本

工业级UPS系统
坚强可靠

Weidmüller

魏德米勒风电照明解决方案 — 高效、可靠、高性价比的完美融合

魏德米勒为全球客户和合作伙伴提供高品质的风电照明解决方案。

魏德米勒风电照明解决方案立足客户的实际需求和产品特性, 针对性的提供个性化解决方案, 高效、可靠、性价比高。可以为风机内部提供供电和照明一站式解决方案。

您之成功, 我们力助

魏德米勒电联接(上海)有限公司

电话: 86 21-22195008 网址: www.weidmueller.com.cn