

DOI: 10.7667/PSPC161992

配电网固定串联补偿多目标优化

周鑫¹, 王韶², 张文龙², 汪俊宇², 覃日升¹, 李胜男¹

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217;
2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

摘要: 为了更好地利用固定串联补偿电容器改善网架薄弱、供电半径大以及长线路末端有重负荷配电网的电压偏差, 研究了确定固定串联补偿电容器选址定容的多目标优化方法。以电压整体偏差、串联补偿容抗和有功网络损耗最小为目标建立配电网固定串联补偿多目标优化模型。基于灵敏度方法和固定串联电容器减小线路电压损耗的原理确定安装固定串联电容器候选线路和补偿容抗取值范围。运用带精英策略的快速非支配排序遗传算法求解建立的模型。算例验证了方法的可行性和有效性。结果表明串联电容器能够有效地提高电压质量和降低有功网络损耗。
关键词: 配电网; 固定串联补偿; 多目标优化; 带精英策略的快速非支配排序遗传算法

Multi-objective optimization of fixed series compensation in distribution network

ZHOU Xin¹, WANG Shao², ZHANG Wenlong², WANG Junyu², QIN Risheng¹, LI Shengnan¹

(1. Yunnan Power Grid Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Kunming 650217, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, (Chongqing University), Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to utilize fixed series capacitor more reasonably to improve the voltage deviations of the distribution network with weak structure, big radius of power supply and heavy load in the end of long feeder, the multi-objective optimization method is researched on determining the location and size of the fixed series capacitor. A multi-objective model used for optimizing fixed series compensation condensance in the distribution network is built. The objective functions of the model are consisting of the minimum of integral voltage deviation, condensance of series capacitor and active network loss. Based on sensitivity method and the principle reducing the line voltage loss by fixed series capacitor, the candidate line for fixed series capacitor installation and calculate ranges of series compensation condensance are determined. Fast and elitist non-dominated sorting generic algorithm is used to solve the optimization model. The simulation examples validate the feasibility and effectiveness of the method. The results show that the series capacitor of the distribution network can effectively improve voltage quality and reduce active network losses.

Key words: distribution network; fixed series compensation; multi-objective optimization; fast and elitist non-dominated sorting generic algorithm

0 引言

配电网直接与用户相连, 其电压质量的优劣关系到用电设备的安全优质运行。配电网中采用并联无功补偿技术可以改善电压质量和降低网损^[1-9]。近年来, 为解决网架薄弱、供电半径大、重负荷长线路配电网线损高、末端电压低以及电压跌落严重等问题, 固定串联电容补偿技术也在国内逐渐引起重视^[10]。

串联电容器提供的无功功率与线路电流的平方成正比, 具有负荷“自适应”和实时响应的特点。因此串联电容补偿能够改善电压分布^[10-22]、减小系

统需要的无功功率^[11]、减小电压跌落^[11-12,15-18]、增加线路容量^[11,13-14,16]和降低线损^[10,16]。文献[19-20]还研究了线路串联和并联补偿的兼容性问题。文献[21]采用一种等值方法将实际多节点辐射形线路等效为只有一个负荷节点的线路, 用于确定配电网串联电容的安装位置和容量。文献[22]以网损最小为目标函数、补偿度为约束条件建立配电网串联补偿单目标优化模型, 运用遗传算法求解该模型。

固定串联电容器在配电网中安装位置和容抗的不同对改善电压分布有不同影响, 因而串联电容器的选址定容是一个非线性优化问题。在上述文献

中, 只有文献[22]优化计算了串联电容器的安装位置和容抗, 但其方法存在的主要不足有: 目标函数未考虑电压因素, 使最终优化方案不能很好地满足电压质量的要求; 没有计及变压器分接头和变压器低压侧并联电容器无功补偿容量对电压的调节作用, 不能实现串联电容器和有载调压变压器的组合调压。针对该问题, 本文在分析固定串联电容器减小线路电压损耗原理的基础上, 以电压整体偏差、串联电容器补偿容抗和有功网络损耗最小为目标函数建立配电网固定串联补偿多目标优化模型。基于灵敏度方法和串联补偿原理提出一种确定安装固定串联电容器候选线路和串联补偿容抗取值范围的方法。运用带精英策略的快速非支配排序遗传算法求解建立的模型; 采用层次分析法和模糊技术从得到的 Pareto 最优解集中确定最优方案。

1 线路串联补偿的原理

假设某配电网中的线路 $i-j$ 安装有固定串联电容器, 如图 1 所示。线路 $i-j$ 的电压损耗为

$$\Delta U_{ij} = \sqrt{C + f(X_C)} - U_j \quad (1)$$

$$C = U_j^2 + (P_j^2 + Q_j^2)(R_L^2 + X_L^2)/U_j^2 + 2(P_j R_L + Q_j X_L) \quad (2)$$

$$f(X_C) = (P_j^2 + Q_j^2)(X_C^2 - 2X_L X_C)/U_j^2 - 2Q_j X_C \quad (3)$$

式中: U_i 和 U_j 分别为线路 $i-j$ 的首末端节点电压; R_L 和 X_L 分别为线路 $i-j$ 的电阻和电抗; X_C 为固定串联电容器的容抗; P_j 和 Q_j 分别为经线路 $i-j$ 流到末端节点 j 的有功功率和无功功率。

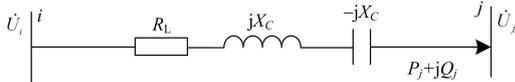


图 1 配电网中安装固定串联电容器的线路

Fig. 1 A line with fixed series capacitor in distribution network

由式(1)和式(2)可知, C 与 X_C 无关, 可看作常数, 因此 ΔU_{ij} 将随着 $f(X_C)$ 的变化而变化。式(3)的 $f(X_C)$ 是一个关于 X_C 的开口向上的抛物线。对 $f(X_C)$ 求导可得 $f(X_C)$ 取最小值时对应的容抗值为

$$X_{Cr} = U_j^2 Q_j / (P_j^2 + Q_j^2) + X_L \quad (4)$$

假设图 1 中线路 $i-j$ 的参数为: $U_j=1$ p.u., $P_j+jQ_j=0.2+j0.1$ p.u., $R_L+jX_L=0.3+j1$ p.u.^[20], 则线路 $i-j$ 的 ΔU_{ij} 与 X_C 之间的关系如图 2 所示。

由图 2 可见, 当 $0 \leq X_C \leq X_{Cr}$ 时, ΔU_{ij} 在下降段, 增加 X_C 可以减小 ΔU_{ij} ; 当 $X_C > X_{Cr}$ 时, ΔU_{ij} 在上升段, 随着 X_C 增大, ΔU_{ij} 反而增大。因此串联电容器容抗的取值范围应取为 $[0, X_{Cr}]$ 。

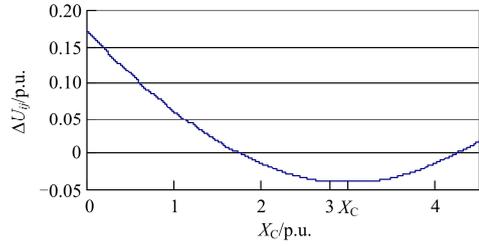


图 2 线路 $i-j$ 的电压损耗与补偿容抗之间的关系

Fig. 2 Relationship between voltage loss of line $i-j$ and compensation condasance

2 配电网固定串联补偿多目标模型

本文以电压整体偏差、串联补偿容抗和有功网络损耗最小为目标函数建立模型。约束条件除包括常规的功率平衡、节点电压和线路电流等约束外, 还计及了电源变电站有载调压变压器分接头约束, 补偿容抗的取值范围约束, 变压器低压侧并联电容器无功补偿容量约束。此外, 增加了允许装设固定串联补偿电容器的线路数量约束以满足不超过工程实际允许安装的线路数量要求。模型建立如下。

$$\min \Delta U_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N (U_i - U_{\text{exp}})^2 \quad (5)$$

$$\min X_{C\Sigma} = \sum_{l=1}^H X_{Cl} \quad (6)$$

$$\min P_{\text{loss}} \quad (7)$$

$$\text{s.t. } P_{is} - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (8)$$

$$Q_{is} - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \quad (9)$$

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad (10)$$

$$I_l \leq I_{\max} \quad (11)$$

$$T_{\min} \leq T \leq T_{\max} \quad (12)$$

$$0 \leq X_{Cl} \leq X_{Cl\max} \quad (13)$$

$$0 \leq Q_{Cl} \leq Q_{C\max} \quad (14)$$

$$L \leq L_{\text{exp}} \quad (15)$$

式中: U_{exp} 为节点电压期望值; N 为节点总数; X_{Cl} 和 $X_{Cl\max}$ 分别为候选线路 l 的固定串联电容器补偿容抗及上限值; H 为候选线路数量; P_{loss} 为有功网络损耗; P_{is} 和 Q_{is} 分别为节点 i 的注入有功和注入无功; G_{ij} 、 B_{ij} 和 δ_{ij} 分别为节点 i 和 j 之间的节点导纳矩阵互电导、互电纳和相角差; U_{\max} 和 U_{\min} 分别为电压上下限; I_l 和 I_{\max} 分别为线路 l 流过的电流和载流量; T 、 T_{\max} 和 T_{\min} 分别为主变压器分接头档位及上下限; Q_C 和 $Q_{C\max}$ 分别为变压器低压侧并联无功补偿容量及上下限; L 和 L_{exp} 为候选线路安装固

定串联电容器的线路数和允许安装的线路数。

3 配电网固定串联补偿多目标模型的求解

3.1 确定安装固定串联补偿的候选线路

为减少优化计算时间, 本文采用电压整体偏差目标函数对各线路串联补偿容抗的灵敏度来确定装设串联补偿电容器的候选线路。其近似表达为

$$\frac{\partial(\Delta U_{\Sigma})}{\partial X_{Cl}} \approx \frac{\Delta(\Delta U_{\Sigma})}{\Delta X_{Cl}} = \frac{\Delta U_{\Sigma}(\Delta X_{Cl}) - \Delta U_{\Sigma}(0)}{\Delta X_{Cl} - 0} \quad (16)$$

式中, ΔX_{Cl} 为容抗微小变化量, 如 10^{-4} 。

假设配电网线路数为 m , 变压器低压侧并联电容器组数为 q , 变压器分接头档位数 z , 各线路的串联补偿容抗分别为 $X_{C1}, X_{C2}, \dots, X_{Cm}$ 。首先在不同变压器低压侧并联电容器组数和分接头档位下依次计算 ΔU_{Σ} 对各线路串联补偿容抗的灵敏度; 再按灵敏度从小到大排序得到不同并联电容器组数和分接头下以支路号为元素的矩阵; 由于该灵敏度应小于零, 因此最后在其前 H 列构成的子阵中, 将灵敏度较小且出现次数较多的前 H 条线路作为装设串联补偿电容器的候选线路。

3.2 确定候选线路串联补偿容抗取值范围

根据对线路串联补偿原理的分析, 本文采用变步长方法确定候选线路串联补偿容抗取值范围。

假设串联补偿容抗初始步长为 a , 变步长系数为 $r(0 < r < 1)$, 最小步长为 ε 。在每一个变压器低压侧并联电容器组数和分接头档位下, 分别对各装设串联电容器的候选线路, 增大串联补偿容抗 a 后, 通过潮流计算得到候选线路末节点电压和电压损耗, 据此选择下一步计算:

1) 若增大串联补偿容抗 a 后, 候选线路串联补偿容抗末节点的电压越限, 则计算过程返回到串联补偿容抗增大 a 前的状态, 令 $a=r \times a$ 继续计算。

2) 若增大串联补偿容抗 a 后, 候选线路电压损耗比增大前的电压损耗大, 则计算过程返回到串联补偿容抗增大 $-2a$ 后的状态, 令 $a=r \times a$ 继续计算。

当 $a < \varepsilon$ 时, 则停止计算。在对全部变压器低压侧并联电容器组数和分接头档位计算结束后, 对每一个确定的低压侧并联电容器组数, 取每条线路在不同档位下的容抗值上限的最大值作为该候选线路在该组数下容抗值的上限; 最后取每条线路在不同组数下的容抗值上限的最大值向下取整后的值作为候选线路容抗值上限。

3.3 求解固定串联补偿多目标模型的步骤

本文运用带精英策略的快速非支配排序遗传算法^[23](NSGA-II)求解建立的配电网固定串联补偿多

目标模型。具体步骤如下。

1) 在输入原始数据后, 分别用 3.1 节的灵敏度方法和 3.2 节的变步长方法确定装设串联补偿电容器的候选线路及串联补偿容抗取值范围。

2) 形成初始种群。染色体采用十进制整数码, 编码格式为

$$[T, Z, X_{C1}, X_{C2}, \dots, X_{Cl}, \dots, X_{CH}] \quad (17)$$

式中: T 为变电站主变压器分接头档位; Z 为变电站主变压器低压侧并联电容器的组数; X_{Cl} 为候选线路 l 的串联补偿容抗值。

3) 对种群每个个体解码后按最大负荷进行潮流计算, 检查约束条件。对满足约束条件的个体计算目标函数值, 否则目标函数置一个大数作为惩罚值。

4) 进行非支配排序、选择、交叉和变异等遗传操作产生下一代种群。

5) 判断是否继续计算, 若进化代数达到最大进化代数, 则停止计算转到 6); 否则转到 3) 继续计算。

6) 采用层次分析法和模糊技术从得到的 Pareto 最优解集中确定最优个体。先通过构造的判断矩阵运用几何平均法^[24]确定各子目标的权重值; 再利用目标满意度隶属度函数^[25]确定个体的各目标满意度; 然后将各目标满意度加权求和得到个体的目标值; 最后以目标值最大的个体作为最终方案。

7) 首先按照最终方案配置的串联电容器位置及容量在配电网中安装串联电容器, 然后由潮流计算确定在不同负荷率下通过调节变电站有载调压变压器分接头和低压侧并联电容器容量配电网能够适应的最小负荷。

4 算例分析

运用本文方法分别对文献[26]中的 10 节点辐射形配电网和一个实际配电网计算固定串联电容器优化配置方案。计算时, 电源电压为 1 p.u., $L_{exp}=1$, $U_{max}=1.07$ p.u., $U_{min}=0.93$ p.u.。种群规模为 2000, 最大代数为 100, 交叉率和变异率分别取为 0.9 和 0.1。电压整体偏差、串联补偿容抗和有功网络损耗 3 个目标函数的重要程度依次设置为 9、8 和 3。

4.1 10 节点配电网算例

10 节点辐射形配电网的负荷和线路数据见文献[26]; 接线如图 3 所示。分别在负荷水平为最大负荷的 1 倍、0.6 倍和 0.4 倍下进行计算^[22]。 $H=5$ 。

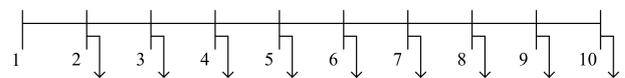


图 3 10 节点配电网接线图

Fig. 3 Wiring diagram of 10-node distribution network

计算结果如表1—表3所示。表1是本文方法(方法1)装设串联补偿电容器的候选线路及串联电容器的最大容抗值。在表2和表3中,方法2是文献[22]的方法。表2中方法2的串联电容器容抗是根据其串补度定义和3种负荷水平下优化得到的串补度计算得出的。用这些容抗通过潮流计算可得到表3中方法2的最低电压和有功功率损耗。

表1 10节点配电网的候选线路及串联电容器最大容抗

Table 1 Candidate line and maximum condensation of series capacitor in 10-node distribution network

负荷水平	装设串联电容器线路的最大容抗/ Ω				
	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
1	15	18	20	24	15

表2 安装串联电容器的线路和容抗

Table 2 Installation line and condensation of series capacitor

负荷水平	方法1		方法2	
	线路 4-5	线路 3-4	线路 5-6	线路 8-9
1	20 Ω	2.2206 Ω	4.5588 Ω	8.6276 Ω
0.6	20 Ω	2.2117 Ω	4.5497 Ω	8.6184 Ω
0.4	20 Ω	2.0828 Ω	4.5588 Ω	8.3323 Ω

表3 优化方案潮流结果

Table 3 Power flow results of optimization schemes

负荷水平	串联补偿前			方法1			方法2	
	$U_{max}/$	$U_{min}/$	$P_{loss}/$	$U_{max}/$	$U_{min}/$	$P_{loss}/$	$U_{min}/$	$P_{loss}/$
	p.u.	p.u.	kW	p.u.	p.u.	kW	p.u.	kW
1.0	1	0.838	783.78	1.034	0.935	646.23	0.877	722.19
0.6	1	0.909	251.07	1.028	0.971	233.39	0.929	240.90
0.4	1	0.941	106.17	1.021	0.983	98.13	0.954	103.57

在表3中,尽管3种负荷水平下,方法2通过装设串联电容器把最低电压从无串联电容器补偿时的0.838 p.u.、0.909 p.u.和0.941 p.u.分别提高到0.877 p.u.、0.929 p.u.和0.954 p.u.,把有功功率损耗从无串联补偿时的783.78 kW、251.07 kW和106.17 kW分别降低到722.19 kW、240.90 kW和103.57 kW,但在负荷水平1.0和0.6时,线路最低电压不能满足电压下限的要求。而且,由表2可见,在3种负荷水平下都需要在3个位置(线路3-4、5-6和8-9)装设串联电容器,因此安装投资费用大。

由表3可见,在方法1的结果中,3种负荷水平下的线路最高电压分别为1.034 p.u.、1.028 p.u.和1.021 p.u.,最低电压分别为0.935 p.u.、0.971 p.u.和0.983 p.u.,均能满足正常运行时电压上下限要求;有功功率损耗分别为646.23 kW、233.39 kW和98.13 kW,均分别小于方法2的有功功率损耗。

由表2可见,方法1在3种负荷水平都只需在1个位置(线路4-5)装设串联电容器,安装投资费用小。因此方法1的优化方案比方法2的优化方案好。

4.2 实际配电网算例

实际配电网算例接线如图4所示。该配电网的电源变电站有2台SZ₁₁-3150/35的变压器,变比为35±3×2.5%/11, $P_0=4$ kW, $I_0=0.81\%$, $P_k=26$ kW, $U_k=11\%$ 。低压侧母线上除图4的线路外,其余等效负荷为1728+1296 kvar,3组并联电容器共1002 kvar。图4配电网中的馈线全长为91 km,供电半径为29.54 km,节点2—22之间的主馈线截面为70 mm²,其余线路主要为50 mm²和35 mm²,少量为25 mm²;负荷变压器容量共计5535 kVA,节点48接有300 kvar的并联电容器。线路和负荷数据如附表所示,其中负荷数据是根据各负荷点的配电变压器额定容量,且考虑了同时系数为0.8,最大负荷率为50%确定的。

对图4配电网在未装设串联电容器、变压器分接头在不同档位和并联电容器在不同组数时进行潮流计算,线路首末端节点的电压如表4所示。

表4 实际配电网中线路首末端节点电压

Table 4 Voltage of the head node and end node in the real distribution network

分接头档位	并补组数	节点2的电压/p.u.	节点116的电压/p.u.
-7.5%	0	1.1552	0.9345
-5.0%	0	1.1226	0.8921
-2.5%	0	1.0916	0.8506
0	0	1.0620	0.8098
+2.5%	3	1.0473	0.7889
+5%	3	1.0206	0.7499
+7.5%	3	0.9951	0.7109

在表4中,主变压器分接头档位分别为-7.5%、-5%和-2.5%时,线路首端节点2的电压分别为1.1552 p.u.、1.1226 p.u.和1.0916 p.u.,均越上限;而分接头档位分别为-5%、-2.5%、0%、2.5%、5%和7.5%时,线路末端节点116的电压分别为0.8921、0.8506 p.u.、0.8098 p.u.、0.7889 p.u.、0.7499 p.u.和0.7109 p.u.,均越下限。可见对于这种网架薄弱、供电半径大、长线路及末端有重负荷的配电网,变电站主变压器分接头无论取哪一个档位和无论投入多少组低压侧并联电容器,都不能使该线路所有节点电压满足电压允许偏差的要求。

运用本文方法对图4的实际配电网进行固定串联补偿优化计算。 $H=20$ 。安装固定串联补偿候选线路及串联电容器的最大容抗的结果如表5所示。

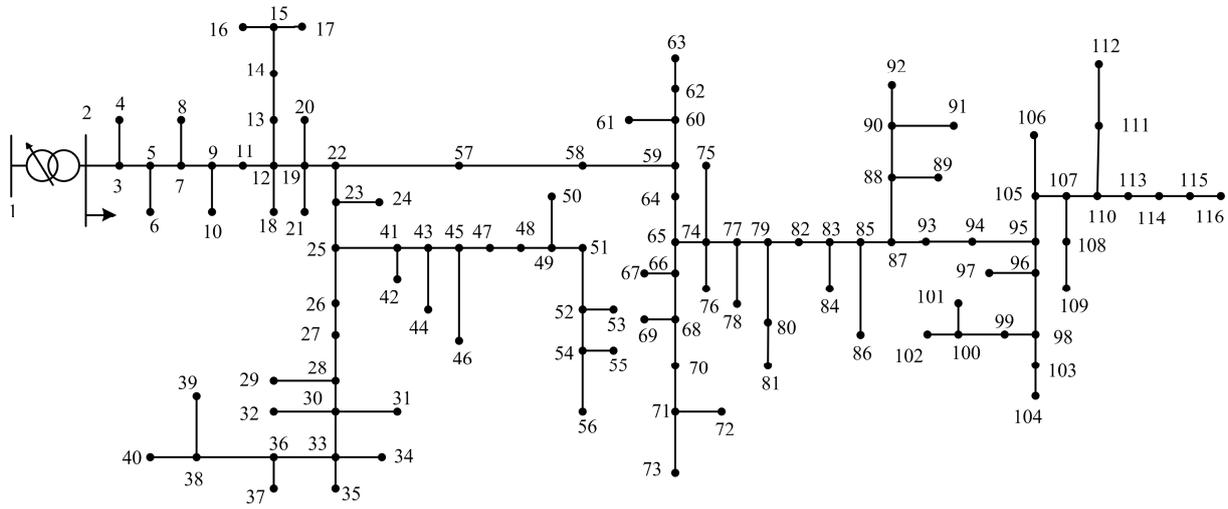


图4 实际配电网接线图

Fig. 4 Wiring diagram of a real distribution network

表5 实际配电网装设串联电容器的候选线路及最大容抗
Table 5 Candidate line and maximum condensation of series capacitor in the real distribution network

序号	首端节点	末端节点	最大容抗 Ω	序号	首端节点	末端节点	最大容抗 Ω
1	65	74	54	11	57	58	48
2	85	87	64	12	58	59	48
3	74	77	57	13	12	19	23
4	79	82	63	14	19	22	23
5	82	83	62	15	9	11	22
6	83	85	63	16	11	12	21
7	77	79	57	17	7	9	16
8	64	65	49	18	5	7	15
9	59	64	49	19	2	3	12
10	22	57	42	20	3	5	13

优化计算得到的最优方案为: 变压器分接头档位为+2.5%, 变电站低压侧并联电容器投入3组, 在主干线段65-74上加装容抗为32 Ω 的串联补偿电容器。按照此优化方案可得加装串联补偿电容器之后部分节点的电压如表6所示。串联补偿前后主干线上部分节点的电压分布如图5所示。

由图5可见, 相对于加装串联补偿装置前, 在加装串联补偿装置线段之后的主干线节点电压有明显提高。由表4和表6可见, 在负荷率、变压器分接头和低压侧并联电容器组数相同的情况下, 加装串联补偿装置后线路末端电压由0.7889 p.u.提高到0.9702 p.u., 使供电电压偏差满足要求, 有效地改善了电压质量。此外, 串联补偿前后的有功网损为382.0830 kW和291.6583 kW。可见串联补偿也降低了有功网损。

表6 实际配电网装设串联电容器后部分节点电压

Table 6 Some node voltage after installing series capacitor in the real distribution network

负荷率/%	分接头/%	并补组数	节点电压/p.u.				
			2	48	56	74	116
1	5.0	3	1.0441	1.0580	1.0576	1.0521	1.0497
43	5.0	3	1.0295	0.9463	0.9316	1.0456	0.9628
44	2.5	2	1.0509	0.9681	0.9536	1.0678	0.9859
47	2.5	2	1.0500	0.9614	0.9464	1.0656	0.9765
48	2.5	3	1.0541	0.9640	0.9489	1.0695	0.9784
50	2.5	3	1.0528	0.9507	0.9324	1.0641	0.9702

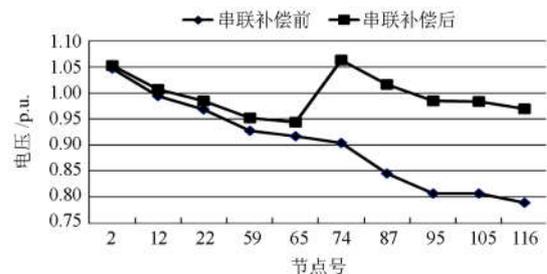


图5 安装串补前后主干线上部分节点电压分布

Fig. 5 Some node voltage distribution on main feed line before and after installing series compensation

由表6还可见, 按照本文方法得到的最优方案安装串联电容器后, 可以使配电网在负荷率为1%~50%的范围内运行。在负荷率为1%时, 由于负荷很小, 节点48装有柱上式并联电容器, 因此该节点电压最高, 为1.0580 p.u.。随着负荷的增加, 由于串联电容器的调压作用, 线路上的最低电压节点不再是末端节点116, 而是节点56。这是由于节点56在串联电容器安装位置之前的节点22的分支线上,

串联电容器不能提高该分支线的节点电压。因此只能通过调整变压器分接头和低压侧并联补偿电容器使其电压合格。在表 6 中, 负荷率在 43%~50%时, 变压器分接头由 5%调整为 2.5%, 投入的低压侧并联补偿电容器由 3 组调整到 2 组, 再到 3 组, 能够使全线电压合格。如果负荷再增加, 节点 56 的电压将越下限。此时调低变压器分接头档位, 则导致节点 74 电压越上限。若不投入串联电容器, 由表 4 可见, 末端节点 116 越下限。故该配电网的最大负荷率为 50%。本文按最大负荷配置的串联电容器能够满足最小负荷运行的要求。

附录

附表 算例配电网线路参数和负荷数据

Attached Table Circuit parameters and load data of the example distribution network

首节点	末节点	电阻/ Ω	电抗/ Ω	有功/kW	无功/kvar	首节点	末节点	电阻/ Ω	电抗/ Ω	有功/kW	无功/kvar	首节点	末节点	电阻/ Ω	电抗/ Ω	有功/kW	无功/kvar
2	3	0.6107	0.4858	0.0000	0.0000	25	41	0.4328	0.2528	9.6000	7.2000	77	79	0.7541	0.4405	0.0000	0.0000
3	4	0.0806	0.0471	17.4000	11.9053	41	42	0.8165	0.4769	9.6000	7.2000	79	80	0.7137	0.2192	3.2000	2.4000
3	5	0.1526	0.1214	0.0000	0.0000	41	43	1.0099	0.5899	0.0000	0.0000	80	81	0.9119	0.2800	50.4800	32.3618
5	6	0.4693	0.2742	9.6000	7.2000	43	44	0.1756	0.0733	9.6000	7.2000	79	82	0.9400	0.5491	0.0000	0.0000
5	7	0.3096	0.2463	0.0000	0.0000	43	45	0.6980	0.4077	0.0000	0.0000	82	83	0.0233	0.0136	0.0000	0.0000
7	8	0.4498	0.2628	9.6000	7.2000	45	46	0.7529	0.5989	120.3600	62.4496	83	84	0.0382	0.0160	3.2000	2.4000
7	9	0.0396	0.0315	0.0000	0.0000	45	47	1.8780	1.0970	32.0000	24.0000	83	85	0.7295	0.4261	0.0000	0.0000
9	10	0.2501	0.1461	6.4000	4.8000	47	48	0.8240	0.4813	0.0000	0.0000	85	86	0.0605	0.0353	16.0000	12.0000
9	11	0.6363	0.5062	0.0000	0.0000	48	49	1.1649	0.6804	0.0000	0.0000	85	87	1.4207	0.8298	0.0000	0.0000
11	12	0.0144	0.0115	0.0000	0.0000	49	50	0.0619	0.0258	25.6000	19.2000	87	88	0.1166	0.0681	0.0000	0.0000
12	13	0.9551	0.5579	51.2000	38.4000	49	51	0.0422	0.0247	0.0000	0.0000	88	89	0.0491	0.0287	25.6000	19.2000
13	14	0.4599	0.2686	64.0000	48.0000	51	52	1.9201	0.8018	0.0000	0.0000	88	90	1.6840	0.9837	0.0000	0.0000
14	15	0.3194	0.1334	0.0000	0.0000	52	53	0.0200	0.0084	120.3600	62.4496	90	91	1.5888	0.4879	3.2000	2.4000
15	16	0.7817	0.3264	6.4000	4.8000	52	54	1.3386	0.5590	0.0000	0.0000	90	92	1.7659	1.0315	16.0000	12.0000
15	17	1.2376	0.5168	51.2000	38.4000	54	55	0.0091	0.0038	120.3600	62.4496	87	93	1.1063	0.6462	16.0000	12.0000
12	18	0.1422	0.0437	3.2000	2.4000	54	56	1.2877	0.5377	73.8000	38.2369	93	94	1.6065	0.9384	16.0000	12.0000
12	19	0.6458	0.5137	0.0000	0.0000	22	57	1.2077	0.7055	3.2000	2.4000	94	95	0.5752	0.3360	0.0000	0.0000
19	20	0.0473	0.0276	16.0000	12.0000	57	58	1.2443	0.7268	0.0000	0.0000	95	96	0.2646	0.1546	0.0000	0.0000
19	21	0.2438	0.1424	16.0000	12.0000	58	59	0.0384	0.0224	0.0000	0.0000	96	97	0.0788	0.0460	6.4000	4.8000
19	22	0.3114	0.2477	0.0000	0.0000	59	60	0.0455	0.0190	0.0000	0.0000	96	98	0.3654	0.2134	0.0000	0.0000
22	23	1.5649	0.9141	0.0000	0.0000	60	61	0.3849	0.1607	3.2000	2.4000	98	99	0.0063	0.0037	0.0000	0.0000
23	24	0.9526	0.5564	16.0000	12.0000	60	62	0.3986	0.1664	9.6000	7.2000	99	100	0.0069	0.0040	0.0000	0.0000
23	25	0.2104	0.1229	0.0000	0.0000	62	63	0.2503	0.1045	9.6000	7.2000	100	101	0.3730	0.2179	17.4000	11.9053
25	26	0.0844	0.0493	9.6000	7.2000	59	64	0.3219	0.1880	16.0000	12.0000	100	102	1.0168	0.5940	50.4800	32.3618
26	27	0.0995	0.0581	0.0000	0.0000	64	65	0.3364	0.1965	0.0000	0.0000	98	103	0.4473	0.2613	64.0000	48.0000
27	28	1.2776	0.7463	0.0000	0.0000	65	66	0.1367	0.0799	0.0000	0.0000	103	104	0.6766	0.3952	32.0000	24.0000
28	29	0.0265	0.0155	16.0000	12.0000	66	67	0.0749	0.0230	3.2000	2.4000	95	105	0.0756	0.0442	0.0000	0.0000
28	30	1.2499	0.7301	0.0000	0.0000	66	68	0.5462	0.3191	0.0000	0.0000	105	106	0.0592	0.0346	32.0000	24.0000
30	31	0.0519	0.0217	1.6000	1.2000	68	69	0.0548	0.0320	17.4000	11.9053	105	107	0.3465	0.2024	0.0000	0.0000
30	32	0.1143	0.0351	25.2400	16.9762	68	70	0.4441	0.2594	9.6000	7.2000	107	108	0.0309	0.0180	0.0000	0.0000
30	33	0.8379	0.4894	0.0000	0.0000	70	71	1.1094	0.6480	0.0000	0.0000	108	109	0.2526	0.1476	17.4000	11.9053
33	34	0.3427	0.2002	25.6000	19.2000	71	72	1.5977	0.4906	6.4000	4.8000	107	110	0.2646	0.1546	0.0000	0.0000
33	35	0.0630	0.0368	32.0000	24.0000	71	73	0.0561	0.0328	25.6000	19.2000	110	111	0.0693	0.0405	0.0000	0.0000
33	36	0.1222	0.0714	0.0000	0.0000	65	74	0.8480	0.4953	0.0000	0.0000	111	112	0.2236	0.1306	87.0000	53.6859
36	37	0.1115	0.0651	16.0000	12.0000	74	75	2.5400	0.7800	50.4800	32.3618	110	113	1.1831	0.6911	16.0000	12.0000
36	38	0.1380	0.0806	0.0000	0.0000	74	76	0.2079	0.1214	1.6000	1.2000	113	114	0.0019	0.0011	0.0000	0.0000
38	39	0.0687	0.0401	16.0000	12.0000	74	77	0.5594	0.3268	0.0000	0.0000	114	115	0.3988	0.2329	17.4000	11.9053
38	40	0.1770	0.1034	9.6000	7.2000	77	78	0.1770	0.1034	9.6000	7.2000	115	116	0.5059	0.2955	338.2400	163.8171

5 结论

本文研究了采用固定串联补偿改善配电网电压质量问题。建立了以电压整体偏差、补偿容抗和有功网络损耗最小为目标的多目标优化模型。运用 NSGA-II 确定配电网固定串联电容器安装位置和容抗的优化配置方案。仿真算例表明, 对于网架薄弱、供电半径大、长线路及末端有重负荷的配电网, 通过加装的串联补偿装置与变电站主变压器分接头和低压侧并联补偿电容器容量实现组合调压, 能够有效改善配电网的电压质量和降低网损。

参考文献

- [1] MENDES A, FRANCA P M, LYRA C, et al. Capacitor placement in large-sized radial distribution networks[J]. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 2005, 152(4): 496-502.
- [2] 胡晓阳, 王卫平, 王主丁, 等. 一种实用的配电网无功运行两层优化方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 14-21.
HU Xiaoyang, WANG Weiping, WANG Zhuding, et al. A practical two-phase optimization method of dynamic var optimization in a distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 14-21.
- [3] 张海鹏, 林舜江, 刘明波, 等. 低压配电网无功补偿及效益评估系统的开发和应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 129-136.
ZHANG Haipeng, LIN Shunjiang, LIU Mingbo, et al. Development of low voltage distribution networks reactive power compensation and benefit assessment system and its application[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 129-136.
- [4] 郑能, 丁晓群, 管志成, 等. 含多种分布式电源的配电网多目标无功优化研究[J]. 陕西电力, 2017, 45(5): 17-21.
ZHENG Neng, DING Xiaoqun, GUAN Zhicheng, et al. Multi-objective reactive power optimization of distribution system with multiple distribution generation types[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(5): 17-21.
- [5] 谢海波, 武小梅, 林翔, 等. 含分布式电源的配电网无功优化研究综述[J]. 广东电力, 2017, 30(2): 102-109.
XIE Haibo, WU Xiaomei, LIN Xiang, et al. Review on reactive power optimization for power distribution network with distribution generation[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(2): 102-109.
- [6] 蒋嘉焱, 李红伟, 向美龄, 等. 基于改进教与学算法的配电网无功优化[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(7): 58-63, 84.
JIANG Jiayan, LI Hongwei, XIANG Meiling, et al. Reactive power optimization of distribution power system based on improved teaching-learning optimization algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(7): 58-63, 84.
- [7] 郑程拓, 丁晓群, 郑能, 等. 计及主动管理的含风电源主动配电网无功补偿规划[J]. 陕西电力, 2017, 45(6): 30-35.
ZHENG Chengtuo, DING Xiaoqun, ZHENG Neng, et al. Reactive power compensation planning for active distribution power network with wind power considering active management[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(6): 30-35.
- [8] 向萌, 左剑, 王文林, 等. 基于改进量子遗传算法的配电网无功优化研究及应用[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(8): 32-37.
XIANG Meng, ZUO Jian, WANG Wenlin, et al. Reactive power optimization of the distribution network based on the improved quantum-inspired genetic algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(8): 32-37.
- [9] 刘健, 王魁元, 张志华. 部分电缆替代法解决农村配电网电压质量问题[J]. 陕西电力, 2016, 44(9): 60-64, 70.
LIU Jian, WANG Kuiyuan, ZHANG Zhihua. Voltage quality improving in rural distribution grids with cable replacement method[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(9): 60-64, 70.
- [10] 张良华, 艾绍贵, 高峰, 等. 配电网固定串联补偿综合节能评估[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 276-282.
ZHANG Lianghua, AI Shaogui, GAO Feng, et al. Comprehensive energy savings evaluation of the fixed series capacitor compensation in distribution network[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 276-282.
- [11] MISKE S A. Considerations for the application of series capacitors to radial power distribution circuits[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 306-318.
- [12] FARIED S O, ABORESHAID S. Stochastic evaluation of voltage sags in series capacitor compensated radial distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 744-750.
- [13] 赵文忠, 王东平. 串联无功补偿技术在配电网中的应用分析[J]. 低压电器, 2010(5): 37-39, 44.
ZHAO Wenzhong, WANG Dongping. Application analysis of series reactive power compensation in distribution network[J]. Low Voltage Apparatus, 2010(5): 37-39, 44.
- [14] 吴勇海, 蔡金锭. 中压配电网串联电容补偿调压技术研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 140-144.
WU Yonghai, CAI Jinding. Study and application of voltage regulation technology by series capacitance compensation in medium voltage distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 140-144.
- [15] 卓谷颖, 江道灼, 梁一桥, 等. 改善配网电压质量的固定串联补偿技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 61-67.
ZHUO Guying, JIANG Daozhuo, LIANG Yiqiao, et al. A research of D-FSC for improving voltage quality in distribution networks[J]. Power System Protection and

- Control, 2013, 41(8): 61-67.
- [16] 王笑棠, 王曜飞, 宋亚夫, 等. 串联补偿解决 10 kV 配电线路高压与低压问题的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(2): 33-37.
WANG Xiaotang, WANG Yaofei, SONG Yafu, et al. Research on series capacitor compensation technique solving 10 kV distribution line high-voltage and low-voltage problems[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(2): 33-37.
- [17] 张先泰, 蔡金锭, 丁智华, 等. 电容补偿在配电网电压调节中的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(2): 116-118, 128.
ZHANG Xiantai, CAI Jinding, DING Zhihua, et al. Application of capacitance compensation in voltage adjustment of distribution power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(2): 116-118, 128.
- [18] 周封, 肖强, 刘志刚, 等. 配电网串联电容补偿对电机机端电压调节性能的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 107-114.
ZHOU Feng, XIAO Qiang, LIU Zhigang, et al. Effects of regulating performance of voltage at the motor terminals with series capacitance compensation in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 107-114.
- [19] 任强, 杨涛, 谢伟峥, 等. 串联补偿装置与并联补偿装置兼容运行[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(1): 1-4, 15.
REN Qiang, YANG Tao, XIE Weizheng, et al. Compatible operation of series and shunt compensation installations[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(1): 1-4, 15.
- [20] 杨尚瑾, 许海, 宋晓通, 等. 辐射状配电线路串联和并联补偿的兼容性[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 763-768.
YANG Shangjin, XU Hai, SONG Xiaotong, et al. Compatibility of series and shunt compensators for radial distribution lines[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 763-768.
- [21] BUCATARIU I, SURIANU F D. Optimal placement of fixed series capacitor in distribution networks[C] // Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines, 2008: 65-70.
- [22] DAS S, DAS D. Series capacitor compensation for radial distribution networks[C] // 2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, 2011: 178-182.
- [23] 冯士刚, 艾芊. 带精英策略的快速非支配排序遗传算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电工技术学报, 2007, 22(12): 146-151.
FENG Shigang, AI Qian. Application of fast and elitist non-dominated sorting generic algorithm in multi-objective reactive power optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(12): 146-151.
- [24] 汪应洛. 系统工程[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2003: 130-140.
- [25] JAHROMI M E, EHSAN M, MEYABADI A F. A dynamic fuzzy interactive approach for DG expansion planning[J]. Electrical Power & Energy Systems, 2012, 43: 1094-1105.
- [26] GRAINGER J J, LEE S H. Capacity release by shunt capacitor placement on distribution feeders: a new voltage-dependent model[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(5): 1236-1244.

收稿日期: 2016-12-02; 修回日期: 2017-09-06

作者简介:

周鑫(1984—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统规划、电力系统无功优化; E-mail: zhouxin8421@126.com

王韶(1956—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统规划与可靠性、电力系统运行与控制; E-mail: wangshao100@163.com

张文龙(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划与可靠性。

(编辑 周金梅)