基于混合补偿方式的低压配电台区无功补偿实用策略研究

针对低压配电台区无功优化问题，提出采用集中补偿和分散补偿相结合的混合补偿方式进行无功补偿。首先分析两类补偿方式在改善电能和经济运行方面的优劣，以此提出混合方式进行无功补偿，其次建立以台区无功优化综合运营效益的目标函数，通过遗传算法进行混合补偿最优容量求解，确定无功补偿节点和节点容量。最后提出适用于实际低压台区无功补偿的实用估算方法。以上海某地低压台区为例，验证所提策略具有改善电能质量好、综合收益高等优点。

廖天明　傅晓飞　纪坤华／国网上海市电力公司

廖天明／高级工程师

关键词／Keywords
无功优化·
混合补偿·
补偿容量·
运营效益·
实用估算·

0　引言

随着我国电力工业的飞速发展，居民用电以年均20%以上的速度快速增长，低压配电台区特别是城区台区负荷增长迅速，导致整个台区的无功需求增加[1]。若不及时对台区无功进行补偿，将会导致线路末端的用户电压越下限，一方面导致供电质量下降，另一方面也增加线路网损。工程中通常采用集中补偿和分散补偿进行台区无功补偿[2]。但在何处采用何种方式以及各种补偿方式容量大小能够使台区运行成本最低仍缺乏统一认识。

文献[3]提出单相潮流计算方法，充分考虑低压配电台区的三相不平衡现象，对无功优化降网损问题提出效果评估，但未考虑实际补偿过程中的节点问题。文献[4]提出无功补偿可以降低台区网损的理论依据。文献[5]将网损减小量作为指标实现目标优化。文献[6]提出基于树状配电线路并联电容器无功优化规划方法，将净节约金额最大值为目标进行优化求解。文献[7]分析了集中补偿和分散补偿的优劣，但其补偿方案较为固定。文献[8]提出以网损为最优目标的分散配置优化方法，有效降低网损。文献[9]提出了能够考虑多个负荷水平的配电网中压和低压无功补偿优化配置模型，利用遗传算法求解，取得了较好的效果。但对于低压配电台区如何将集中补偿和分散补偿相结合的混合方式实现兼顾电能质量和经济性的研究少有涉及。

针对低压配电网中无功补偿装置，规划人员最为关心的是以何种方式补偿、在何处补偿以及以多大容量补偿。集中补偿可减少无功优化投资成本，但无法实现全台区的有效补偿，尤其是中端和末端电压，电能质量改善效果不明显；分散补偿能够很好地改善电能质量，但由于分散补偿点多，在台区节点较多的情况下导致投资成本增加。因此采用集中补偿和分散补偿相结合的无功补偿方式可较好提高台区无功补偿的经济性。本文通过建立以低压配电台区综合运营效益为目标的无功优化模型，以各节点的电压偏移和无功补偿限值作为约束条件，设计计及无功补偿投资运维成本和节省网损费的经济模型，并通过遗传算法求解最优组合，实现台区无功优化的综合运行成本最低。

1　无功优化指标

1.1　节点电压合格率

电压合格率β指的是台区内电压合格的节点数与总节点数的比值。在低压台

区中规定允许偏差值在额定电压的－10%～7%范围内即为合格，无功补偿的主要目的之一就是提高台区内的电压合格率。电压合格率β为

$$\beta=\frac{n_2}{n_1} \tag{1}$$

1.2 节点电压限值

在低压配电台区各节点中，为保证各节点电压不越限值，要对各节点电压进行越限设置。为了保证电动机的正常起动，相关规程规定电动机起动时母线电压必须在额定电压U_N的80%以上，故将负荷节点的运行电压下限设置为$0.9U_N$，上限设置为$1.1U_N$，即

$$0.9U_N<U_1,U_2,\cdots,U_n<1.1U_N \tag{2}$$

1.3 无功补偿投资成本指标

对低压配电台区进行无功补偿能够减少网损，提高输电效率，从而降低配电网的运维费用，但由于增加无功补偿装置，使台区初期投资较大。因此，为了实现配电网的经济性运行，需考虑无功补偿装置投资成本C_1和节省网损费用C_2。

1.3.1 无功补偿装置成本

无功补偿装置成本包括购买成本以及后期的运维成本，将无功补偿装置的使用周期量化。则有

$$C_1=N\left(C_0+\sum_{i=0}^{n-1}C_k\sigma\right) \tag{3}$$

$$\sigma=\left(\frac{1+r}{1+R}\right)^t \tag{4}$$

式中，C_0为单台无功补偿装置的购买成本；C_k为单台无功补偿装置的运维成本；r为通货膨胀率；R为社会贴现率。

1.3.2 无功补偿网损节省费用

无功补偿可降低低压台区网损，从而降低台区的运维费用。无功补偿网损节省费用C_2可表示为

$$C_2=TP_k\tau a \tag{5}$$

式中，T为设备寿命；τ为无功补偿运行时间，h；a为购电电价，按照上海地区电价标准；P_k为由于无功补偿装置而节省的有功功率。

则根据以上分析可得：安装无功补偿装置所减少的投资成本为

$$C=C_2-C_1 \tag{6}$$

2 集中补偿与分散补偿比较

无功补偿应遵循“全面规划，合理布局，分级补偿，就地平衡”的基本原则。不同的无功补偿方式和无功补偿容量直接影响着台区的电能质量，同时也在很大程度上影响台区网损，因此，分析集中补偿方式和分散补偿方式下的优劣成为补偿方式选择的关键。

2.1 集中补偿方式

集中补偿方式是低压台区常用的无功补偿方式，以上海某台区为研究对象，采用集中补偿进行台区电压质量和综合效益情况分析。台区基本结构如图1所示。

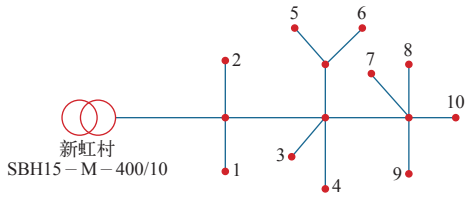

图1 新虹村台区拓扑结构

该系统拓扑各节点的功率如表1所示。

表1 系统拓扑各节点功率情况

负荷节点	有功功率/kW	无功功率/kvar	负荷节点	有功功率/kW	无功功率/kvar
1	39.149	28.262	6	0.128	0.079
2	46.176	32.618	7	2.658	1.648
3	16.522	10.240	8	20.243	12.546
4	20.436	12.665	9	25.191	15.612
5	1.533	0.950	10	17.124	7.423

以配电变压器台区低压侧节点电压为平衡节点进行集中补偿，设定补偿装置的初始投资为100元/kvar，安装盒每个成本为5 000元。年运维费用为初始投资成本的20%。台区变压器容量为400 kV·A，根据《国家电网公司电力系统无功补偿配置技术原则》中规定集中补偿方式下的补偿量按配电变压器容量的20%～40%配置。根据台区实际无功情况可知，无功需求总量在120 kvar以内，故补偿容量设定为80 kvar、100 kvar及120 kvar进

行电压质量和综合效益计算。

2.2 分散补偿方式

由线损理论可知，线路可变损失的85%集中在主干线路，因此在主干线路特别是前中段尽量减少安装电容器组，应安装于各个分支，使其“就地补偿”，分散补偿方式要根据潮流计算获取电压偏差较多的节点进行补偿，按照其所需无功容量近似补偿。并通过前推回代法进行台区线路潮流计算，得出电压质量及网损。但分散补偿初始投资大，设备运维管理难度大。

2.3 不同补偿方式综合效益比较

选取不同补偿容量80 kvar、100 kvar及120 kvar情况下进行集中补偿和分散补偿，分散补偿根据各点的无功情况按比例分配，两种方式下节点电压分布如图2和图3所示。

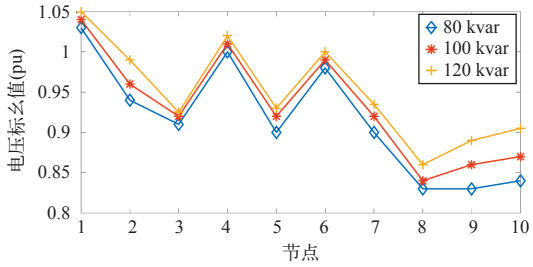

图2 集中补偿下不同补偿容量节点电压曲线

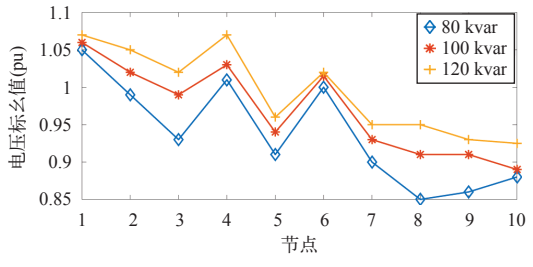

图3 分散补偿下不同补偿容量节点电压曲线

由图2和图3可知，集中补偿情况下电压偏移较大，出现越下限情况较多，通过比较电压合格率，集中补偿的电压合格率分别为0.7、0.7和0.8，分散补偿的电压合格率为0.7、0.9和1。因此可以得到分散补偿的优点之一是提高电压质量。

计算两类补偿情况下台区网损和综合运行成本，其中r取0.04，R取0.08，τ取4 000 h，a取0.617元/kW，产品寿命按10年计，单个安装盒的成本为5 000元。

计算结果如表2所示。

表2 不同补偿方式下不同容量无功补偿效果

方案	电压合格率	节省功率/kW	综合效益/万元
集中补偿80 kvar	0.7	2.52	2.71
集中补偿100 kvar	0.7	3.43	4.42
集中补偿120 kvar	0.8	4.16	5.68
分散补偿80 kvar	0.7	3.97	−5.85
分散补偿100 kvar	0.9	5.94	−1.52
分散补偿120 kvar	1	7.60	2.03

由上表可清晰看出，集中补偿的优势在于前期投资少，回收周期短，劣势是电压合格率较低，电能质量较差，网损降低幅度较小。分散补偿的优势在于电压合格率较高，网损降低幅度大，劣势在于由于增加了无功补偿装置，初期投资较大，导致成本回收周期长，综合效益较低，甚至出现亏损等情况。

3 基于遗传算法实现无功补偿优化问题

由上节可知，集中补偿与分散补偿各有优缺点，配电台区的安全稳定运行是首要条件，需在满足电压质量的基础上实现综合效益最大化，实现系统经济性运行。因此本文提出在满足电压限定条件基础上实现集中补偿与分散补偿相结合的混合补偿方式进行无功优化。基于遗传算法进行目标组合寻优，遗传算法具有全局优化优点，可较好地实现最优组合的全局搜索。因此可将遗传算法应用于集中补偿与分散补偿的优化组合系统中。具体步骤如图4所示。

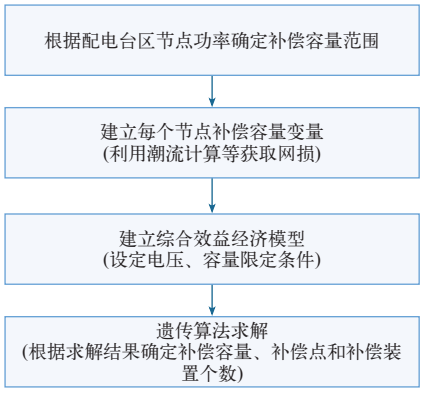

图4 遗传算法求解混合最优补偿方式流程图

3.1 综合运营效益目标函数

本文的目标函数是低压配电台区的综合运营效益，综合运营效益C包括无功补偿装置初期投资成本，各套装置运维成本以及无功优化所节省的网损费用。

设定Q_{ci}为各节点的补偿容量，目标函数具体如下

$$C = TP_k \tau a \sum_{i=0}^{T-1} \sigma - N\left(C_0 + \sum_{i=0}^{n-1} C_k \sigma\right) \quad (7)$$

约束条件：$Q_f + \sum_{1}^{10} Q_{ci} = Q_c$；$0.9U_N < U_1, U_2, \cdots, U_{10} < 1.1U_N$；$Q_{ci} < Q_{cimax}$，$Q_{ci}$中至少一项不为0。

说明：目标函数中的P_k、约束条件中的U_i是以潮流计算为基础与Q_{ci}有关，Q_f为集中补偿容量。

Q_c分别取不同补偿容量80 kvar、100 kvar和120 kvar，经遗传算法求得最优化结果如表3所示（根据实际补偿容量取整数）。

表3 混合补偿方式下不同补偿容量无功优化结果

补偿方案	Q_{ci}/kvar	β	节省网损/kW	运营效益/万元
80 kvar	无解（电压约束条件难以满足）	–	–	–
100 kvar	$Q_{c1}=0$ $Q_{c2}=0$ $Q_{c3}=0$ $Q_{c4}=0$ $Q_{c5}=2$ $Q_{c6}=0$ $Q_{c7}=2$ $Q_{c8}=12$ $Q_{c9}=16$ $Q_{c10}=8$ $Q_f=47$	0.9	4.92	1.35
120 kvar	$Q_{c1}=0$ $Q_{c2}=0$ $Q_{c3}=0$ $Q_{c4}=0$ $Q_{c5}=0$ $Q_{c6}=0$ $Q_{c7}=0$ $Q_{c8}=12$ $Q_{c9}=19$ $Q_{c10}=9$ $Q_f=80$	0.9	5.07	4.42

由表3分析可知以下两种方案。

1）选择100 kvar的补偿容量，需要在5、7、8、9和10五个节点安装分散补偿装置，并在低压母线侧进行集中补偿。5、7、8、9和10五个节点的补偿容量分别为2 kvar、2 kvar、12 kvar、16 kvar和8 kvar。集中补偿容量为47 kvar。

2）选择120 kvar的补偿容量，需要在8、9和10三个节点安装分散补偿装置，并在低压母线侧进行集中补偿。8、9和10三个节点的补偿容量分别为12 kvar、19 kvar和9 kvar。集中补偿容量为80 kvar。

通过比较节省网损和运营效益，方案二降网损效果较好，运营效益高，故本文案例选择方案二作为补偿方案。

3.2 基于实际应用的补偿点及补偿容量估计

由3.1节可知，两种方案下的节点补偿容量均近似等于该节点的无功需求量。对于节点的选择，由于分散补偿能够提高电能质量，提升节点电压，提高节点的功率因数，降低低压配电台区网损，因此根据潮流计算和上节优化结果可知，补偿点应选择电压合格率较低的节点，即线路中后段需安装无功补偿装置。将上节方案二用于本文案例中，得到电压曲线如图5所示。

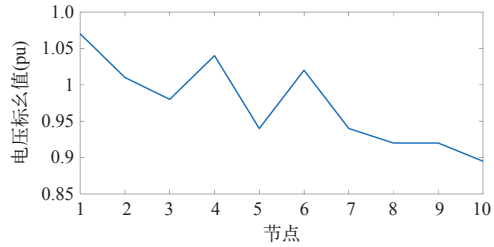

图5 120 kvar混合补偿下各节点电压曲线

通过在方案二的混合补偿方式无功优化方案兼顾了电压质量和综合效益，同时也说明了在实际工程中，可通过简单潮流计算获得各点电压标幺值，对电压相对较小的节点进行分散无功补偿，补偿容量根据其无功需求进行配置，在低压母线侧进行集中补偿，补偿容量为《国家电网公司电力系统无功补偿配置技术原则》中规定补偿的配电变压器容量与分散补偿的差值，本文案例验证了此种实际估算策略的可行性。

4 结束语

本文针对低压配电台区的无功优化问题，提出混合无功补偿策略及其工程估算方法。通过分析集中补偿和分散补偿的优劣确定优化方向和目标，建立以综合运营效益为目标的经济模型，并将潮流计算结合遗传算法优化配置容量，实现低压配电台区的经济运行。通过具体案列分析补偿点和补偿容量的确定，提出在电压偏移较大节点实施无功分散补偿，补偿容量满足其无功需求即可；并提出在实际工程建设中，仅需经简单潮流

(下转第80页)

28-31.

[3] 蒲超廷，杨帆，肖彬，等．基于全寿命周期成本的配电设备检修管理 [J]．电气应用，2016，35 (4)：77-81.

[4] Pham Hoang，Wang Hongzhou．Imperfect maintenance [J]．European Journal of Operational Research，1996，94 (3)：425-438.

[5] 黄良沛，刘德顺，岳文辉，等．面向重组维修的机械系统可靠性建模与仿真 [J]．机械工程学报，2008，44 (6)：224-230.

[6] 刘有为，马麟，吴立远，等．电力变压器经济寿命模型及应用实例 [J]．电网技术，2012，36 (10)：235-240.

[7] 彭飞进，高滨，田浩，等．健康指数理论与设备状态检修应用综述 [J]．电气应用，2015 (增刊1)：648-654.

[8] 袁志坚，孙才新，李爱华，等．模糊多属性决策状态维修策略 [J]．高电压技术，2004，30 (8)：33-35.

[9] 钟海峰，陈强．电力设备两阶段预防性维修策略的优化研究 [J]．电网技术，2007，31 (2)：53-55.

[10] 金玉兰．生产系统有限时间区间弹性周期预防性维修策略研究 [D]．上海：上海交通大学，2009.

[11] 金玉兰，蒋祖华，侯文瑞．以可靠性为中心的多部件设备预防性维修策略的优化 [J]．上海交通大学学报，2006，16 (12)：102-105.

[12] 蔡景，左洪福，等．复杂系统成组维修策略优化模型研究 [J]．应用科学学报，2006，24 (5)：533-537.

[13] 王灵芝，徐宇工，张家栋．基于与设备有效度和可靠度的预防修经济优化模型 [J]．机械工程学报，2010，46 (2)：163-168.

[14] 陈京荣，俞建宁，李引珍．基于蚁群算法的多属性路径选择模型 [J]．系统工程，2009，27 (5)：30-34.

[15] 项前，赵永光．基于多目标蚁群优化的交通路径优化研究 [J]．微计算机信息，2012，28 (5)：8-10.

[16] Gao Wenke，Zhang Zhisheng，Zhou Yifan．Optimal quasi-periodic maintenance policies for two-unit series system [J]．Journal of Southeast University，2013 (4)：450-455.

（收稿日期：2018－01－23）EA

(上接第61页)

计算可确定补偿点及补偿容量，可实现低压配电系统中无功优化的经济性。

参考文献

[1] 李宏，董瑾．无功补偿技术的研究 [J]．现代电子技术，2011，34 (6)：175-178.

[2] 朱建军，卢志刚．中低压配电网的无功补偿 [J]．2011，32 (4)：19-23.

[3] 黄慧军．基于单相潮流计算的低压台区无功补偿效果评估 [J]．湖州师范学院学报，2015，12 (37)：70-73.

[4] 戴晓亮．无功补偿在配电网中的应用 [J]．电网技术，1999，23 (6)：11-14.

[5] 许红兵．并联电容器无功补偿经济运行 [J]．电力电容器，2006 (2)：12-17.

[6] 刘健，阎昆，程红丽．树状配电线路并联电容器无功优化规划 [J]．电网技术，2006，30 (18)：81-84.

[7] 欧阳森，耿红杰，陈欣晖．考虑综合效益的低压配网台区无功补偿评估方法及其应用 [J]．现代电力，2015，32 (4)：62-67.

[8] 黄晓彤，陈文炜，林舜江，等．低压配电网无功补偿分散配置优化方法 [J]．南方电网技术，2013，12 (2)：44-49.

[9] 胡泽春，钟明明，王佳贤，等．考虑多负荷水平的中低压配电网无功补偿优化规划 [J]．电工技术学报，2010 (8)：167-173.

[10] 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.

（收稿日期：2018－04－20）EA