

基于 ETAP 的配电网电容器定容选址

孙 健

(江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211100)

摘 要: 本文针对含风电机组的配电网, 提出了一种基于 ETAP 的电容器定容选址优化方法, 其基本原理是基于遗传算法求解线性规划的问题。在仿真过程中将 DG 视为负荷, 提出一种长时间尺度上的“无功静态控制”, 实现动态与静态相结合的无功优化, 经 ETAP 仿真计算后, 结果显示: 所有母线电压得到补偿; 在规划期间由于无功损耗的减少使支路输电容量增加并带来了一定的收益, 整个配网系统经济效益达到最佳; 对于含风电机组的配电网, 其无功优化效果更加明显。仿真结果表明, ETAP 在配电网的电容器规划中有很高的可靠性和准确性。

关键词: ETAP; 分布式电源 (DG); 无功补偿; 线性规划; 经济效益

0 引言

含分布式电源的配电网出现无功不足^[1-3]主要是由于: 配电网中存在大量的感性用电设备, 以及分布式电源需要吸收一定的无功功率。电容器能够补偿无功需求, 但不同的电容器容量和安装位置会产生完全不同的结果。因此, 需要确定最佳的安装位置和电容器容量, 使整个配电网的经济性最佳。

国内外许多学者对含分布式电源的配电网无功优化有诸多的研究成果。陈旺虎通过标准系统测试分析了分布式电源接入位置与容量对配电网无功的影响^[4]; 陈海焱以网损为目标函数, 采用遗传算法对计及分布式电源的配电网进行无功优化^[5]; 郭力、王成山采用下垂控制策略, 在微网孤岛运行时为其提供有功无功支撑, 有效抑制了电压和频率偏差^[6]。

安装电容器是一种常用的无功补偿方法, 其关键在于电容器的定容选址。目前, 电容器的定容选址优化有三种基本的研究方法。第一种是动态规划, 将电容器的大小视为离散变量^[7]; 第二种是线性规划, 将电容器容量和安装位置视为连续变量^[8]; 第三种是将传统分析法和启发式算法结合^[9]。

本文分布式电源以风电机组为例, 将其视为负荷^[10], 提出一种长时间尺度上的“无功静态控制”, 实现了动态与静态相结合的无功优化: 规划周期内的动态与各负荷等级上的静态。基于 ETAP 软件, 针对含有风电机组的配电网建模, 以系统成本为目标函数, 综合考虑初始安装成本、运行成本、利率

和物价增长, 利用遗传算法实现电容器定容选址的优化求解。分析了并联电容器的无功补偿效果, 并比较了风电机组并网前后, 并联电容器无功补偿效果的差异。

1 电力系统无功功率平衡

配电网中存在的变压器及其他感性用电设备运行在一个滞后的功率因数状态下, 不仅需要消耗大量的有功功率, 还需要从电网吸收大量的无功功率。无功不足将导致电压降低、损耗增加、功率因数降低, 使得系统运行成本提升。电力系统中的无功平衡的基本要求是系统的无功源所发出的无功功率应大于等于系统所消耗的无功。为保证系统可靠运行, 需配备有一定的无功功率备用容量。系统中无功功率平衡关系如式 (1) 所示:

$$Q_{GC} - Q_{LD} - Q_L = Q_{res} \quad (1)$$

其中: Q_{GC} 一电源供应的无功功率之和;

Q_{LD} 一无功负荷之和;

Q_L 一无功功率损耗之和;

Q_{res} 一无功功率备用。 $Q_{res} > 0$ 表示系统中无功富余, 可以满足无功平衡; $Q_{res} < 0$ 表示系统无功不足, 应考虑加设无功补偿装置。

为改善电压质量和降低网路损耗, 应尽量避免通过电网元件大量地传输无功功率。因此, 仅从全系统的角度进行无功功率平衡是不全面的, 应分地区分电压等级进行无功功率平衡。一般情况下, 超高压电网需配置并联电抗器补偿, 较低电压等级的

配电网需配置必要的并联电容器补偿^[11]。本文涉及到的配电网电压等级较低，需并联电容器进行无功补偿。其主要作用体现在：控制电压、增加系统容量、减少系统功率损耗。

2 电容器定容选址的线性规划描述

2.1 目标函数

电容器定容选址优化的关键在于选取合适的目标函数，如网损最小、电压偏移量最小以及电容器成本最小。本文是以系统成本为目标函数，成本包括四个部分，分别如式（2）、（3）、（4）、（5）表示。

1) 固定电容器安装成本：

$$f_1 = \sum_{i=1}^{N_1} X_i C_{0i} \quad (2)$$

其中： N_1 —安装电容器备选母线的数量；
 X_i —取值为 0/1，0 代表无电容器安装在母线 i 上，1 代表存在电容器安装在母线 i 上；
 C_{0i} —母线 i 上电容器安装成本。

2) 电容器购买成本：

$$f_2 = \sum_{i=1}^{N_1} Q_{ci} C_{1i} \quad (3)$$

其中： N_1 —安装电容器备选母线的数量；
 Q_{ci} —母线 i 上电容器容量 (kVar)；
 C_{1i} —母线 i 上每 kVar 电容器的单价。

3) 电容器组运行成本，包括维护和折旧：

$$f_3 = \sum_{i=1}^{N_1} B_i C_{2i} T \quad (4)$$

其中： N_1 —安装电容器备选母线的数量；
 B_i —电容器的组数；
 C_{2i} —每年每组电容器的运行成本；
 T ：计划使用年限。

4) 有功损耗成本：

$$f_4 = C_2 \sum_{l=1}^{N_2} T_l P_l \quad (5)$$

其中： N_2 —带负荷母线数量；
 C_2 —每 kWh 损耗的成本；
 l —负荷等级，包括最小负荷、平均负荷、最大负荷；
 T_l —负荷等级 l 所经历的时间，单位为小时；
 P_l —负荷等级 l 所损失的功率，单位为 kW。

目标函数为成本的最小值，如式（6）所示：

$$\min f = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \quad (6)$$

2.2 约束条件

无功功率波动带来的最直接的影响就是电压升降：无功过剩会导致电压升高，无功不足会导致电压降低。因此，电容器定容选址优化除了需要时刻保持系统无功功率平衡，还需要所有母线满足电压约束，如式（7）所示：

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max} \quad (7)$$

3 算例分析

从时间间隔长短可将含分布式电源的无功优化控制分为静态控制和动态控制^[11-12]。静态无功控制是短时间尺度上的，将分布式电源的出力视为定值，对算法要求较高，电容器动作频繁；动态无功控制是长时间尺度的，对负荷和分布式电源的参数精度要求较高，且不会保证任意时刻优化达到最优。本文是长时间尺度上的“静态控制”，即动态、静态相结合的处理方法：将负荷和风电机组出力分为最小负荷、平均负荷和最大负荷三个等级，在各个的负荷等级上其值是恒定的。实现了总的规划周期内的动态与各自负荷等级上的静态。

3.1 模型建立

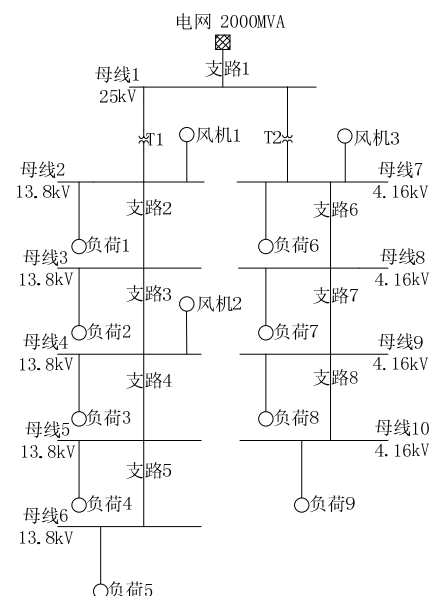


图 1 配网结构示意图

本文基于 ETAP 软件，建立了一个包含风电机组、九个负荷的配网模型，其结构示意图如图 1 所示。取系统基准容量为 2000MVA，变压器 T1 额定功率 25MVA，变压器 T2 额定功率为 7.5MVA，

各母线电压等级如图 1 所示。

3.2 参数设置

(1) 负荷参数

为减少输送无功功率引起的网损，我国相关技术规定，35kV 及以上电压等级直接供电的工业负荷，功率因数要达到 90% 以上，对其他负荷，功率因数不低于 85%。本文的负荷电压等级虽未到达 35kV，但为减少网损，功率因数设的较高，具体参数如表 1 所示。

表 1 负荷参数

负荷编号	视在功率/MVA	功率因数/%
1	2.4	90
2	3.7	88
3	2.78	86.7
4	1.1	89
5	1.47	90
6	1.11	91
7	0.78	87.6
8	0.6	88
9	0.4	91

(2) 风电机组参数

本文模型中选取的三台风电机组的额定功率均为 5MW，功率因数为 85%。分布式电源由于容量小，通常不能用来调峰，可以将其视为一个负荷，即作为 PQ 节点处理。

(3) 成本参数

成本参数包括电容器成本参数和系统成本参数。电容器成本参数如表 2 所示，根据母线电压等级分为三种。ETAP 仿真时，会选择合适的电容器型号，使成本最低。

表 2 电容器成本

电压等级/kV	购买成本/(\$/kvar)	安装成本/\$	年运行成本/(\$/组)
4.16	20	1200	200
13.8	25	1600	300
25	50	1000	400

系统成本参数包括平均能源成本、计划周期以及利率，如表 3 所示。

表 3 能源成本

平均能源成本/(\$/kWh)	计划周期/年	利率/%
0.06	10	4

3.3 仿真结果

本文基于 ETAP 进行仿真，接入风电机组前后电容器安装方案如表 4 所示。表中数据显示，风电机组接入后，电容器总安装容量大幅增加，安装点减少，且主要集中在风电机组并网点附近，符合就地平衡与集中补偿相结合的原则。

表 4 风电机组接入前后电容器安装方案

母线编号	风电机组接入前电容器安装容量/kvar	风电机组接入后电容器安装容量/kvar
1	null	1500
2	600	null
3	1800	2400
4	1500	3300
5	900	2700
6	1200	null
7	null	1000
8	600	null
9	400	1400
10	400	null
总容量	7400	12300

注：表 4 中 null 表示该条母线未并联电容器进行无功补偿。

本次仿真的电压约束为 98%~102%，图 2 给出了未接入风电机组时，并联电容器前后各母线电压的百分比；图 3 给出了接入风电机组后，并联电容器前后各母线电压的百分比。

比较图 2、图 3 中补偿前的电压，可发现在风电机组并网后，电压会出现降落，主要由于风电机组的接入导致系统无功不足。在并联电容器后，系统中的无功需求得到满足，各级母线电压均在约束范围之内，实现电压补偿。

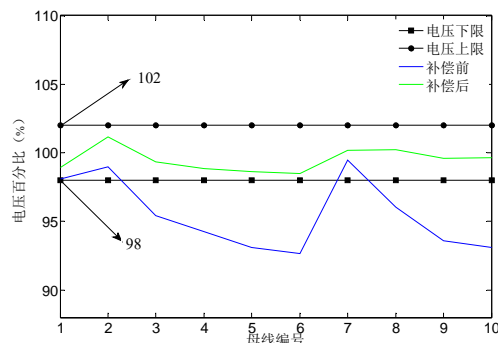


图 2 不含风电机组的配电网电容器安装前后母线电压比较

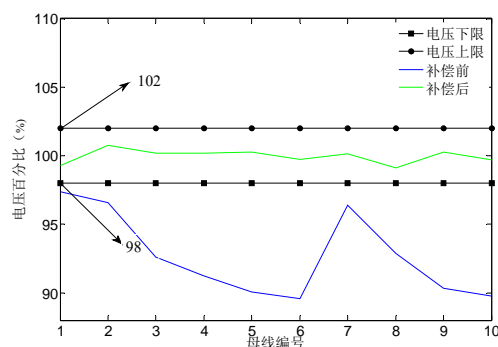


图 3 含风电机组的配电网电容器安装前后母线电压比较

如前述，本文所采用的负荷等级包括最小负荷、平均负荷、最大负荷。在 10 年的计划周期

内,各负荷等级的时间分配分别为 20%、55%、25%。安装电容器后,由于无功损耗的减小,支路输电容量会得到释放。表 5 为风电机组并网前后,并联电容器带来的支路总容量释放对比。相比较于风电机组并网前,风电机组并网后的配电网经并联电容器无功优化,母线电压补偿幅度较大,释放容量也会得到相应的提升。

表 5 风电机组并网前后支路容量释放

工况	最小负荷容量 释放/MVA	平均负荷释放 容量/MVA	最大负荷释放 容量/MVA
未接入 风电机组	3.228	4.355	4.915
接入风电机组	20.804	23.118	24.537

图 4 为风电机组并网前后无功优化带来的收益。配电网并联电容器后,无功潮流得到优化,电压升高,损耗减少,损耗减少每年都会给电网带来相当客观的收益。电容器在一次投入运行后,每年只需投入很小的运行成本,故除第一年外,每年的收益都是正的,且逐年增加。对于含风电机组的配电网,在并联电容器后,其有功损耗减少较大,故其每年的收益相对较高。

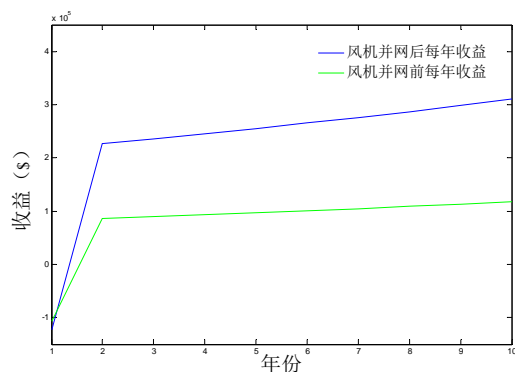


图 4 风电机组并网前后无功优化每年的收益

5 结束语

本文基于 ETAP 软件,建立了一个含有风电机组的配电网系统模型,对其进行电容器定容选址仿真,其基本原理是利用遗传算法求解线性规划问题。为实现十年规划周期内的经济效益最佳,提出一种长时间尺度上的“无功静态控制”,仿真过程中将风电机组视为负荷处理,并在计划周期内按最小负荷、平均负荷和最大负荷进行时间分配,实现动态与静态相结合的无功优化。仿真结果表明:

1) 并联电容器后,配电网的无功潮流得到优化,各母线电压满足条件,有功损耗减少,支路容量增加,带来可观的经济效益;

2) 风电机组并网后,并联电容器无功优化的效果更明显:电压补偿幅度更大,支路释放容量更高,损耗减少带来的年收益更高。

通过本文的仿真结果分析,基于 ETAP 的电容器选址定容优化负荷实际情况,可应用在配电网的前期规划中,为配电网的建设提供可靠的依据。

参考文献:

[1] 陈琳,钟金,倪以信.含分布式发电的配电网无功优化[J].电力系统自动化,2006,30(14):20-24.

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

[3] 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.

[4] 陈旺虎,陈奇志,古树平.配电网潮流前推回代法的一种简单实现方法[J].江苏电机工程,2010,29(4):45-47.

[5] 陈海焱.分布式发电的电力系统分析方法研究[D].武汉:博士学位论文,2008.

[6] 郭力,王成山.含多种分布式电源的微网动态仿真[J].电力系统自动化,2009,33(2):82-86.

[7] H.Duran,"Optimum Number,Location,and Size of Shunt Capacitors in Radial Distribution Feeders:A Dynamic Programming Approach",IEEE Trans.on Power Apparatus and System,vol.87,pp.1769-1774,1968.

[8] M.Kaplan,"Optimization of Number,Location,Size,Control Type,and Control Setting of Shunt Capacitors on Radial Distribution Feeders",IEEE Trans.on PAS,vol.103,pp.2659-2665,1981.

[9] A.A.EL-Kib,J.J.Grainger,and K.N.Clinard,"Optimal Voltage Dependent Continuous Time Control of Reactive Power on Unbalanced Three-Phase Feeders Involving Laterals",IEEE Trans.on Power Apparatus and System,Vol.104,pp.3298-3305,1985.

[10] 万力勇,谭兴.计及分布式电源的配电网无功潮流优化研究[J].电测与仪表,2011,48(548):10-14.

[11] 何仰赞,温增银.电力系统分析[M].武汉:华中科技大学出版社,2002:77-85.

[12] 严干贵,王茂春,穆钢,等.双馈异步风力发电机组联网运行建模及其无功静态调节能力研究[J].电工技术学报,2008,23(7):98-104.

作者简介:

孙 健(1978-),男,安徽人,高级工程师,从事配电网运行控制工作。