

辐射型配电网无功补偿配置的一种算法

轧超¹ 李林川²

(1.天津城市建设学院,天津 300384 2.天津大学,天津 300072)

摘要:为了节约能源,根据10kV配电网辐射型特点,提出一种基于潮流计算和无功精确矩相结合的无功补偿方法。考虑了最大、最小、一般三种负荷方式。首先,为防止无功倒送,在最小运行方式下,以降低网损为目的,通过常规潮流计算和无功二次精确矩二者相结合的方法,确定初始补偿点及其补偿容量。然后根据电压合格率情况,对初步补偿方案进行调整,提高总体运行时的电压合格率。通过算例计算,证实了该方法的合理性、简便性及实用性。

关键词:潮流计算;无功补偿配置;无功二次精确矩;三种运行方式;电压合格率

中图分类号:TM933

文献标识码:B

文章编号:1001-1390(2009)07-0009-04

A Method of Reactive Compensation in View of the Distribution Network

YA Chao¹, LI Lin-chuan²

(1. Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China. 2. Tianjin University, Tianjin 300072, China.)

Abstract: This article proposes a method of reactive compensation based on the flow calculation in view of the 10kV distribution network. Because of actual operation of the distribution network, three load's ways which are the maximal, the minimum and the general one are considered. Under the minimum load's ways, initial compensation scheme, including initial compensation sites and their capacities, is decided with the methods of the conventional flow calculation and reactive quadric accurate moment for the purpose of decreasing the net loss. According to the voltage qualified rate, the initial compensation scheme is adjusted to improve the voltage qualified rate. Through the iteration, the overall voltage qualified rate achieves the request. It's tested on experimental systems of 19-node distribution lines, and the results are satisfying, which confirm the reasonableness, convenience and practicality of presented method.

Key words: flow calculation; reactive compensation allocation; reactive quadric accurate moment; three load's ways; voltage qualified rate

0 引言

无功补偿是节能降耗、改善电网电压质量最方便、最经济有效的方法之一。10kV配电网分支多,用户多,配电变压器均无人值班,目前能自动投切的补偿装置少且造价高,大多数为固定投入形式,不能随负荷变化而改变。为了达到最优补偿效果,且不向主网倒送无功,如何选择无功补偿点和无功补偿容量是非常重要的^[1-5]。

本文提出一种以降低网损,提高电压质量为目的无功补偿计算方法。它用无功精确矩方法确定补偿地点,通过潮流计算确定无功补偿容量。对于负荷变化,近似用最大、最小、一般三种运行方式表示,同时根据

电压合格率对补偿地点和补偿容量进行调整,以达到总体优化的目的。

1 无功补偿优化的数学模型

1.1 目标函数

配电网无功补偿的目的应是降低网损,提高电压质量。对于降低网损的考虑是:分散就近补偿电容器,肯定能降低网损,所以在目标函数中不进行具体考虑。因此目标函数可只是电压合格率。

对于单条10kV配电线路,有:

$$F = \max \left\{ 1 - \sum_{i=1}^L L_i / (Q \cdot m) \right\} \quad (1)$$

式中 F 为电压合格率; L 为系统监察点点数; m 为系统

运行方式总数 L_i 为监察点 i 在 m 种没运行方式中总的越界次数。

1.2 约束条件

无功补偿优化受到很多条件的约束,包括等式约束条件和不等式约束条件。

1.2.1 等式约束条件

$$P_i - U_i \sum_{j \in \Omega_i} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (2)$$

$$Q_i - U_i \sum_{j \in \Omega_i} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \quad (3)$$

式中 n 为系统的节点数; P_i 为节点的有功功率注入量; Q_i 为节点的无功功率注入量; G_{ij} 为节点导纳矩阵中节点 i 、 j 之间的电导; B_{ij} 为节点导纳矩阵中节点 i 、 j 之间的电纳; U_i 为节点的电压; δ_{ij} 为节点 i 、 j 的电压相位差。

1.2.2 不等式约束条件

各节点无功电源和电压的上、下限,以及变压器的分接开关位置上、下限。

$$Q_{G_{i\min}} \leq Q_{Gi} \leq Q_{G_{i\max}} \quad (4)$$

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad (5)$$

$$K_{i\min} \leq K_i \leq K_{i\max} \quad (6)$$

2 配电网的潮流计算

确定适合的潮流计算方法是无功优化计算的前提保证,本文采用一种基于常规开式网潮流算法的潮流计算方法^[6]。

2.1 节点编号

以图1所示的一条43节点的配电线路为例,按从树根到树枝的顺序从小到大依次编号,计算机可对输入的支路进行排队。首先把每一条支路中的点号按小点号在前大点号在后的顺序编排;其次,对所有支路,按每一条支路中的第一个点号由小到大进行排队,点号相同的次序可以任意,排队结果如表1所示。有了这样的排队,计算时就可以保证潮流计算由后到前及由前到后的计算顺序。

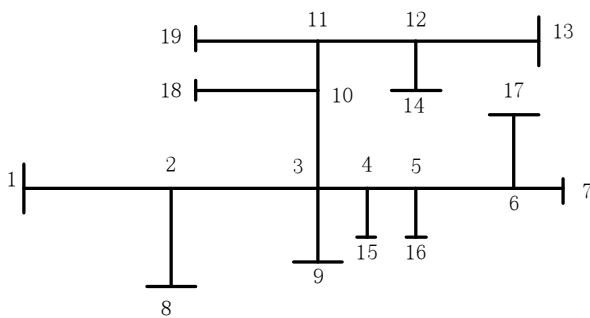


图1 线路接线图

Fig.1 System structure

表1 线路编号

Tab.1 Branch circuit serial number

顺序	支路编号	顺序	支路编号	顺序	支路编号
1	1—2	7	4—5	13	10—11
2	2—3	8	4—15	14	10—18
3	2—8	9	5—6	15	11—12
4	3—4	10	5—16	16	11—19
5	3—9	11	6—7	17	12—13
6	3—10	12	6—17	18	12—14

2.2 功率分布计算

图2所示为某一支路 ($j > i$) j 节点计算功率 $P_j + jQ_j$ 代表 j 节点真正负荷与由 j 节点送出去的所有功率之和。 $-jX_c$ 是节点补偿电容的电抗值。从 j 节点计算到节点的功率分布公式:

$$j \text{ 节点补偿电容提供无功: } Q_{xc=j} = \frac{U_j^2}{X_c} \quad (7)$$

$$j \text{ 节点考虑补偿后的计算功率: } P'_j + jQ'_j = P_j + j(Q_j - Q_{xc}) \quad (8)$$

$$\text{支路 } ij \text{ 的功率损耗: } \Delta P_{ij} + j\Delta Q_{ij} = \frac{P_j^2 + Q_j^2}{U_j^2} R + j \frac{P_j^2 + Q_j^2}{U_j^2} X \quad (9)$$

$$i \text{ 节点送往 } j \text{ 节点的功率: } P_{ij} + jQ_{ij} = P'_j + jQ'_j + \Delta P_{ij} + j\Delta Q_{ij} \quad (10)$$

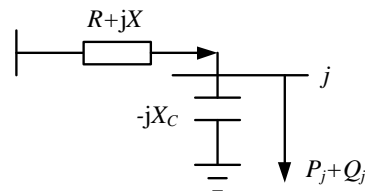


图2 支路示意图

Fig.2 Branch circuit introduction chart

2.3 电压分布计算

从 i 节点向 j 节点计算,节点电压幅值:

$$V_j = \sqrt{(U_i - \Delta U)^2 + (\delta U)^2} \quad (11)$$

$$\text{式中 } \Delta U = \frac{P_j R + Q_j X}{U_j} \quad \delta U = \frac{P_j X - Q_j R}{U_j}$$

$$j \text{ 节点滞后 } i \text{ 节点的电压相角 } \theta_j = \text{tg}^{-1} \left(-\frac{\delta U}{U_i - \Delta U} \right) \quad (12)$$

3 无功二次精确矩

无功二次精确矩定义^[7]为:

$$T_q^2(i) = R_{di} \left(\frac{Q_{bi}^2}{V_i^2} - \sum_{s \in I} \frac{Q_{bs}^2}{V_s^2} \right) \quad (13)$$

式中 R_{di} 表示从 i 节点逆流而上所遇到的所有支路电阻之和; Q_{bi} 、 Q_{bs} 分别为流入 i 节点和节点 s 的支路无功

功率;节点*i*为节点的后续节点。

由于式(13)与力矩公式形式相同 R_{di} 相当于“力臂”, $\frac{Q_{bi}^2}{U_i^2} - \sum_{s \in i} \frac{Q_{bs}^2}{U_s^2}$ 反映了*i*节点的负荷无功功率对于整个网损的作用相当于作用力,且无功功率具有二次函数形式,因此称之为*i*节点的无功二次精确矩,其*i*节点的无功二次精确矩的物理表示如图3所示。

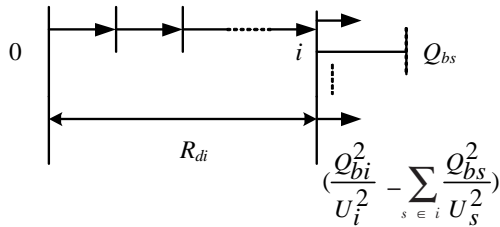


图3 无功二次精确矩的物理表示

Fig.3 Physical representation of reactive accurate moment

负荷无功引起的总有功损耗为:

$$P_1^0 = \sum_{i=1}^n T_q^2(i) \quad (14)$$

式(14)反映了负荷无功功率引起的网损为各节点的无功二次精确矩之和。

4 基于潮流计算和无功精确二次矩的无功补偿方法

4.1 基本思想

在电网的实际运行中,负荷是变化的。如果只按一种负荷情况进行计算确定补偿方案,不符合实际运行情况,如果按照电网的实际运行中负荷变化的各个运行方式去计算,又是不现实的。因此,近似用最大、最小、一般三种运行方式表示负荷的变化。在最小运行方式下确定初始补偿,可保证不发生无功倒送。在

最大运行方式下,根据电压合格率调整补偿方案。

4.2 确定初始补偿方案

无功精确二次矩可以作为最佳补偿点的选择依据。根据配电网结构为树型的特点,其树支末端电压总是最低的。 R_{di} 反映了*i*节点到源节点的电气距离,显然 R_{di} 越大的节点越靠近末端节点,所以选择 R_{di} 较大的节点投放电容器,有助于改善系统的电压水平,而

$$\left(\frac{Q_{bi}^2}{U_i^2} - \sum_{s \in i} \frac{Q_{bs}^2}{U_s^2} \right)$$

这一项则反映了*i*节点的负荷无功功率对于整个网损的作用,该项较大的点是对系统网损有较大作用的敏感节点。使该节点的负荷无功功率降低有利于整个网损的降低,因此 $T_q^2(i)$ 反映了电容器的投放既改善电压水平,又降低网损的综合作用。为避免过补偿,在最小运行方式下进行潮流计算,确定初始补偿点数*K*。选择无功精确二次矩最大的点作为补偿节点,补偿容量取潮流计算时该节点的送入无功,然后用补偿后的数据重新进行计算,选择第二个补偿点,若初始补偿点数定为*K*,则重复进行*K*次选择。

4.3 补偿方案调整

按照4.2确定补偿方案后,用式(1)计算电压合格率,若电压合格率小于给定要求时,应根据电压越限情况来选择新的补偿点,选择在最大运行方式下电压最低的点作为新的补偿点,补偿容量为流入该点的无功功率,原补偿点通过潮流计算修正补偿量。若电压合格率仍不满足,这种新增补偿点可重复进行下去。

5 算例

用上述方法我们编制了计算程序,以图1为例,其为某区域配电网,节点数19个,负荷节点11个。配电网数据如表2和表3所示。

表2 19节点配电网支路参数

Tab.2 Branch circuit parameter

支路编号	阻抗/ Ω	支路编号	阻抗/ Ω	支路编号	阻抗/ Ω
1—2	1.05+j1.2	4—5	0.35+j 0.4	10—11	0.35+j0.4
2—3	0.35+j0.4	4—15	1.05+j1.2	10—18	1.05+j1.2
2—8	1.2+j1.6	5—6	1.05+j1.2	11—12	0.7+j 0.8
3—4	0.35+j0.4	5—16	0.7+j 0.8	11—19	0.7+j 0.8
3—9	0.7+j0.8	6—7	0.35+j 0.4	12—13	0.35+j0.4
3—10	0.7+j0.8	6—17	0.35+j 0.4	12—14	0.35+j0.4

表 3 19 节点配电网负荷数据
Tab.3 Distribution network load data

节点	最小有功负荷	最小无功负荷	一般有功负荷	一般无功负荷	最大有功负荷	最大无功负荷
	/kW	/kVar	/kW	/kVar	/kW	/kVar
7	200	100	270	120	380	200
8	90	40	120	50	160	70
9	70	30	90	40	110	80
10	40	10	60	20	80	30
13	130	60	180	70	250	100
14	100	40	135	45	170	50
15	130	40	180	60	250	100
16	20	10	30	14	50	20
17	170	80	240	100	310	150
18	150	70	210	90	300	100
19	100	30	150	60	200	70

表 4 补偿前和补偿后的各节点电压
Tab.4 Node voltage of before compensative and after compensative

节点	最小方式/kV		一般方式/kV		最大方式/kV	
	补偿前	补偿后	补偿前	补偿后	补偿前	补偿后
1	10.2	10.2	10.3	10.3	10.5	10.5
2	10.0094	10.0749	10.039	10.1049	10.1385	10.2049
3	9.95077	10.0384	9.95856	10.0468	10.0269	10.1158
4	9.92291	10.018	9.92084	10.0167	9.97245	10.0691
5	9.90127	10.0038	9.89194	9.9953	9.93083	10.0352
6	9.83972	9.96464	9.81023	9.93628	9.81382	9.94134
7	9.82853	9.95359	9.79568	9.92191	9.79206	9.91986
8	9.99036	10.056	10.0142	10.0803	10.1053	10.1719
9	9.94343	10.0311	9.94901	10.0373	10.0129	10.1019
10	9.89675	10.0018	9.88292	9.98878	9.92729	10.034
11	9.87974	9.98493	9.8592	9.96532	9.89628	10.0033
12	9.85526	9.96071	9.82735	9.93381	9.85418	9.96169
13	9.84821	9.95372	9.81808	9.92464	9.84122	9.94887
14	9.85008	9.95558	9.82071	9.92724	9.8461	9.9537
15	9.9105	10.0057	9.90327	9.99925	9.9468	10.0437
16	9.89905	10.0016	9.88869	9.99208	9.92569	10.0301
17	9.83042	9.95545	9.79757	9.92378	9.79662	9.92436
18	9.87228	9.97755	9.84955	9.95577	9.88324	9.99043
19	9.87022	9.9755	9.84366	9.94994	9.87643	9.98369

(下转第 31 页)

幅度信号进行压缩,不对小幅度信号扩展,能够更好地保持信号的分布特性,减少信号畸变部分。仿真结果表明,与压扩法相比,本文方法能够更加降低系统 PAPR,而且具有较小的带外功率,可以有效改善系统性能。

参考文献

[1]Josef Urbaf, Roman Marsalek. PAPR reduction by combination of interleaving with repeated clipping and filtering in OFDM [C]. 2007 17th International Conference Radioelektronika. NJ:IEEE, 2007: 4234253.

[2]Seok- Joong Heo, Hyung- Suk Noh, Jong- Seon No, et al. A modified SLM scheme with low complexity for PAPR reduction of OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2007,53(4):p 804- 808.

[3]王林,江秀萍.降低PTS方法复杂度的原理及应用[J]. 电子与信息学报, 2007,29(11):2586- 2588.

Wang Lin, Jiang Xiu-ping. The principle and application to the reduction of PTS' complexity [J].Journal of Electronics and Information Technology,

2007,29(11):2586- 2588.

[4]Tao Jiang, Guangxi Zhu. Nonlinear companding transform for reducing peak- to- average power ratio of OFDM signals [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2004,50(3):342- 346.

[5]Serdar Sezginer, Hikmet Sari. Peak power reduction in OFDM systems using dynamic constellation shaping [C]//Proceedings of EUSIPCO 2005, September 2005,Antalya, Turkey.

[6]Serdar Sezginer, Hikmet Sari. OFDM peak power reduction with simple amplitude predistortion [J]. IEEE Communications Letters, 2006,10 (2): 65- 67.

作者简介:

荆楠(1986-),女,讲师,硕士,主要研究方向为OFDM技术。

Email :xjwl@ysu.edu.cn。

王嘉嘉(1984-),男,硕士研究生,主要研究方向为OFDM技术。

肖丽萍(1963-),女,副教授,博士研究生,主要研究方向为OFDM技术,空时编码技术,扩频序列设计。Email :lpxiao@ysu.edu.cn

收稿日期 2009- 01- 06

(田春雨 编发)

(上接第 12 页)

按最大、一般和最小三种运行方式分别进行计算。经计算节点3、6、10为补偿点,补偿容量分别为150kVar、180kVar、211kVar。补偿前和补偿后的各节点电压及有功损耗计算结果如表4和表5所示。

由表4和表5可看出,补偿后,各节点电压有所改善,电压合格率为1,并且网损降低。

表 5 补偿前后有功损耗变化

Tab.5 Power loss change

	最小方式	一般方式	最大方式
补偿前 $\Delta P/kW$	30.0552	59.9803	102.639
补偿后 $\Delta P/kW$	26.3501	51.2474	96.8132

6 结 论

本文针对辐射型配电网的线路特点,提出的基于潮流计算和无功精确矩的无功补偿方法,经过算例验证,切实可行,效果较好。这种方法计算简单,实用性强,计算量小。采用的三种运行方式符合实际运行情况。根据最小运行方式确定补偿容量可以避免线路轻载时向各根节点倒送无功功率。当电压合格率不满足时,按电压最低点选取新的补偿点,有助于提高线路节点的电压水平。

参考文献

[1]岳梅.电网中无功功率补偿[J].宁夏电力,2006(5):12- 15,47.

YUE Mei. Reactive Power Compensation of Electric Network [J]. Ningxia Electric Power ,2006,(5) :12- 15,47.

[2]张勇军,任震,廖美英,等. 10 kV长线路杆上无功优化补偿[J].华南

理工大学学报,自然科学版,2001,29(4) 22- 25.

ZHANG Yong-jun, Ren Zhen, LIAO Mei-ying, LI Ben-he. Optimal Reactive Compensation on Tower of 10kV Long Distribution Feeder [J]. Journal of South China University of Technology,2001,29(4) 22- 25.

[3]范舜,韩水.配电网无功优化及无功补偿装置[M].北京:中国电力出版社,2003.

[4]王鑫国.10kV配电网无功功率平衡及优化补偿[J].农村电气化,2001,(3) 24- 25.

WANG Xin-guo Reactive Balance and Reactive Compensation of 10kV Distribution Network[J]. Rural Electrification,2001 (3) 24- 25. 2003.

[5]王伟,倪晶.城市配电网的无功功率补偿浅析[J].科技资讯,2006,(27).

WANG Wei,NI Jing Brief Analysis Reactive Compensation of Urban Distribution Network[J]. Science and Technology Information,2006,(27).

[6]李林川,刘艺光等.配电网无功补偿的实用算法[J].西北电力技术,1993,4(8) 56- 58.

LI Lin-chuan,LIU Yi-guang The Utility Method of Reactive Compensation in Distribution Network [J].Northwest China Electric Power, 1993,4 (8) : 56- 58.

[7]矫志宏,蔡中琴,郭志中.辐射型配电网无功补偿的精确矩法[J].继电器,2002,30(9) :11- 14.

JIAO Zhi-hong,CAI Zhong-qin ,GUO Zhi-zhong Accurate moment method for optimization of capacitors in radial distribution systems [J]. Relay, 2002,30(9) :11- 14.

作者简介

轧超(1964-),女,汉族,硕士,副教授,从事无功优化的研究。

Email :yc308@tjuci.edu.cn

李林川(1948-),男,汉族,硕士,教授,从事电力系统优化的研究。

Email :lilinchuan@tju.edu.cn

收稿日期 2008- 11- 15

(田春雨 编发)