

DOI: 10.7667/PSPC151475

## 电缆线路对城市配网变电站无功影响研究

杨继超, 李文升, 韩颖, 赵颖

(国网青岛供电公司, 山东 青岛 266000)

**摘要:** 如今大中型城市电缆线路使用率逐渐升高, 但由于电缆线路对地电容大, 其广泛使用可能导致负荷低谷时出现容性无功倒送, 甚至末端电压升高。为应对该问题, 以电缆线路对城市配网变电站无功功率可能造成的影响为研究对象进行了分析。采用青岛电网实际运行参数, 运用前推后推法首先对不同负荷下单条电缆出线的电路模型进行了分析。然后在此基础上应用叠加原理对具备多条电缆出线的变电站进行分析。最后得出结论, 现有青岛配网运行情况下, 电缆线路的增多很难造成无功倒送或者线路末端电压升高的情况, 亦无需配置感性无功补偿设备, 为城市配电网工程建设提供参考。

**关键词:** 电缆; 前推后推法; 无功过剩; 无功补偿; 感性无功补偿设备

### Research on the effects of cable on the reactive power of urban distribution network

YANG Jichao, LI Wensheng, HAN Ying, ZHAO Ying

(State Grid Qingdao Power Supply Company, Qingdao 266000, China)

**Abstract:** Nowadays, the cable use probability increases in major city, which may lead to lots of problems at low load such as surplus reactive power and terminal voltage increase because of its large capacitance to the earth. To solve this problem, this paper researches the effects of cable on reactive power of urban distribution network. It uses back/forward sweep method to do flow calculation based on the established model of distribution network for single cable line. On this basis, super position theorem is used to analyze the model of transformer substation with multiple cable lines. According to the results, this paper proposes the conclusion that the increasing of cable hardly cause surplus reactive power and terminal voltage increase. Meanwhile, configuring inductive reactive-load compensation equipments is also unnecessary, which provide references for projects.

**Key words:** cable; back/forward sweep method; reactive power surplus; reactive compensation; inductive reactive-load compensation equipment

## 0 引言

随着国民经济的快速发展, 电缆线路由于其受环境影响小、安全性好、供电可靠性高等优势被大量运用于城市配电网中。但由于电缆线路对地电容是架空线路的几十倍。故电缆线路的大规模应用可能导致了容性无功过剩, 从而使低谷负荷时配网可能出现无功倒送, 线路末端电压升高等问题。针对优化电网无功, 降低线路损耗, 提高电压合格率, 国内外学者进行了一系列研究。文献[1]提出了一种多DSTATCOM快速动态静止型无功补偿与TSC无功补偿相结合的方法。文献[2]、文献[3]分别采用粒子群和免疫遗传算法对电网无功优化进行了分析。文献[4]综合改进遗传算法和准动态规划法对配电

网无功进行了优化。文献[5]则提出一种基于极限线损率和极限降损率指标的配电网降损措施。文献[6]则提供了一种“线路调整法”来降低配电网不平衡负载造成的线损。上述研究成果多基于PSCAD、Matlab等研究电力网络的工业标准仿真工具对电网无功分布情况进行分析<sup>[7-9]</sup>。但目前普通工程设计人员由于理论深度和软件应用能力等方面的限制难以对以上成果进行熟练的应用。

目前, 山东省内青岛、济南等地城区配网变电站出线电缆化率均已达到较高水平。因此在负荷低谷时期可能造成无功倒送, 极端条件下还可能引起电缆线路末端电压升高。针对该实际问题, 山东省电力调度中心曾多次要求青岛、济南等地对配电网中电缆线路对变电站无功可能带来的影响进行分

析, 并论证是否需要在电缆出线较多的配网变电站中增加感性无功补偿设备。故构建计算模型供变电设计人员对各类出线与负荷条件下变电站的末端电压及无功潮流情况进行分析。并根据分析结果配置感性无功补偿设备, 对电网建设的顺利实施具有重要意义, 也能有效防止电缆末端电压升高和无功倒送等问题<sup>[10]</sup>。

### 1 单条线路无功分析

本文通过调研得到青岛配电网中电缆线路的参数情况如表 1 所示。其中电缆长度分别取青岛电网电缆出线的一般长度 2 km 和现有最大长度 4 km 为计算参数进行分析。

#### 1.1 边界条件

根据调研, 青岛配电网中电缆线路的参数情况如表 1 所示。

表 1 青岛 10 kV 电缆参数

型号及规格	YJV22-3*240
导体直流电阻/(Ω/km)	0.099
电抗/(Ω/km)	0.069
电纳/(S/km)	0.000 182
线路总长度/km	2 或 4
载流量/A	400
线路首端电压/kV	10.5
负荷的功率因数	0.95

#### 1.2 潮流计算模型

单条电缆线路的潮流计算模型如图 1 所示, 本文近似将线路所供负荷分为两个部分, 分别置于线路末端和线路中央, 负荷的大小相等, 以表达线路负荷沿线均匀分布的情况。

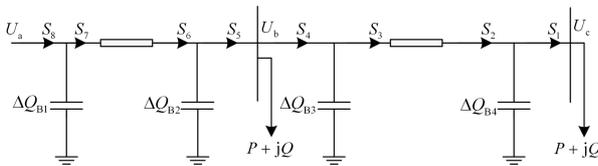


图 1 单条电缆线路潮流计算模型

Fig. 1 Calculation model of single cable line

由表 1 数据可计算线路不同负载率情况下每段的有功功率  $P$  和无功功率  $Q$ 。

$$P = \frac{1}{2} U I_{\max} \cos \phi \eta \quad (1)$$

$$Q = \frac{1}{2} U I_{\max} \sin \phi \eta \quad (2)$$

式中:  $Q$  为每段负荷的总无功功率;  $P$  为每段负荷

的总有功功率;  $U$  为线路运行额定电压;  $I_{\max}$  为线路载流量;  $\phi$  为负荷的功率因数角;  $\eta$  为线路载流量。

潮流计算方法主要采用配电网的前推回推法<sup>[11]</sup>, 该方法收敛性很强, 计算速度快, 计算结果准确性高。

#### 1.3 2 km 线路潮流计算结果

由表 1 可知线路参数, 对应线路负载率分别为 5%、10%、20%、40%、60%、80% 的 6 种情况, 利用图 1 所示模型进行潮流计算。对应线路长度为 2 km 时, 得到潮流分布结果如表 2 所示。

表 2 10 kV 电缆潮流分布(长度为 2 km)

负载率	$\sum Q$	$\sum Q_L$	$\sum Q_B$
5%	33.41	0.10	80.26
10%	147.28	0.40	80.26
20%	375.66	1.62	80.26
40%	834.89	6.55	80.26
60%	1 297.45	14.81	80.26
80%	3 660.31	106.18	80.26

表 2 续 10 kV 电缆潮流分布(2 km)

负载率	$\sum Q_{LD}$	$\sum P$	$U_c$	$\gamma$
5%	113.57	345.68	10.49	4.9%
10%	227.15	691.66	10.49	4.9%
20%	454.30	1 384.50	10.48	4.8%
40%	908.60	2 773.75	10.45	4.5%
60%	1 362.90	4 167.78	10.43	4.3%
80%	3 634.39	11 209.74	10.31	3.1%

表 2 中:  $\sum Q$  为线路首端输出的总无功功率, kvar;  $\sum P$  为线路首端输出的总有功功率, kW;  $\sum Q_L$  为整条线路上的总无功损耗, kvar;  $\sum Q_B$  为整条线路电纳的总充电功率, kvar;  $\sum Q_{LD}$  为线路末端所需的无功负荷, kvar;  $\gamma$  为末端电压偏差率。各参数有如下关系:

$$\sum Q + \sum Q_B = \sum Q_{LD} + \sum Q_L \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{U_c - U_N}{U_N} \quad (4)$$

通过表 2 的数据可知, 单条 10 kV 电缆线路的充电功率约 80.26 kvar 在负载率为 5%~60% 时均大于电缆电缆的无功损耗, 故其作为无功电源存在。在负载率 80% 时电缆的无功损耗大于充电功率, 其作为无功负荷存在。

为了方便观察  $\sum Q_B$  对整个线路无功传输的影响, 我们观察  $\sum Q_B$  与线路  $\sum Q_{LD} + \sum Q_L$  的比例, 并将其记为

$$k = \frac{\sum Q_B}{\sum Q_L + \sum Q_{LD}} \quad (5)$$

不同负载率时  $k$  值如表3所示。

表3 充电功率占无功总负荷比例(2 km)

Table 3 Charging power proportion of total reactive load (2 km)

负荷率	5%	10%	20%	40%	60%	80%
$k$	0.71	0.35	0.18	0.09	0.06	0.02

从  $k$  的值可以看出,  $k$  与负载率成反比, 且均小于1, 由此可知虽然在负荷率低情况下电缆会充当无功电源向负荷输送无功负荷, 但并未构成无功倒送。

从电压角度来看, 相对于线路首端的电压10.5 kV而言, 电缆的充电功率未引起末端电压的升高, 相反由于线路上的功率损耗, 引起了末端电压的下降, 并且随着负荷的增加, 线路末端电压下降也随之增大, 但是均满足规范中电压偏移不超过额定电压7%的规定<sup>[12]</sup>。

因此根据无功潮流计算结果, 当电缆出线为2 km时, 无需增加感性无功补偿设备对无功负荷进行调节。

#### 1.4 4 km 线路潮流计算结果

针对线路长度为4 km的情况仍采用图1所示的计算模型及表2中的6种负载率进行分析。相比线路长度为2 km时, 由于线路末端负荷未变且电缆线路有功损耗相比负荷较小, 故电缆长度增加为4 km后  $\sum P$  及  $\sum Q_{LD}$  均未发生明显变化, 而  $\sum Q_B$ 、 $\sum Q_L$  则变为2 km线路时的两倍, 此处不再赘述。  $\sum Q$ 、 $U_c$ 、 $\gamma$  三个参数的变化如表4所示。

表4 10 kV 电缆潮流分布(4 km)

Table 4 Power flow distribution in 10 kV cable (4 km)

负载率	$\sum Q$	$U_c$	$\gamma$
5%	-46.76	10.49	4.9%
10%	67.39	10.48	4.8%
20%	296.95	10.45	4.5%
40%	761.05	10.41	4.1%
60%	1 231.83	10.36	3.6%
80%	3 686.63	10.10	1.0%

由上述计算结果可知单条电缆线路的充电功率在负载率为5%~60%时均大于电缆的无功损耗, 故其作为无功电源存在。在负载率80%时电缆的无功损耗大于充电功率, 其作为无功负荷存在。

根据表中数据计算出充电功率与无功总负荷的比值如表5所示。

表5 充电功率占无功总负荷比例(4 km)

Table 5 Charging power proportion of total reactive load (4 km)

负荷率	5%	10%	20%	40%	60%	80%
$k$	1.41	0.70	0.35	0.17	0.12	0.04

从  $k$  的值可以看出,  $k$  与负载率基本成反比关系, 当负载率处于10%~80%时,  $k$  小于1。但当负载率低至5%时,  $k$  值达到1.41, 对应表4中线路首端无功功率为-46.76 kvar, 这表明此时电容产生的无功功率大于线路和负荷所需提供的无功总和, 电缆线路向电源倒送无功。

从电压角度来看, 相对于线路首端的电压10.5 kV而言, 线路末端电压也并未因电容充电功率过大而造成出线电压升高, 线路上的功率损耗仍使末端电压产生了随负荷增加而增大的小幅电压下降, 且末端电压最大偏移也未超过标称电压的7%。

因此根据潮流计算结果, 当电缆出线为4 km, 负载率为5%时, 会产生无功倒送, 从而可能引起供电线路、用电设备发热程度加重, 用电设备的实际输出功率降低等一系列问题<sup>[13]</sup>, 需要采用感性无功补偿设备进行无功调节, 其他情况均无需配置感性无功补偿设备。

#### 1.5 单条线路潮流分析结果

综上所述, 从单条电缆线路的角度来看, 对于2 km长的电缆线路而言, 电缆的充电功率对线路无功和电压影响均在有限范围内, 不必装设感性无功补偿设备。而对于4 km长的电缆线路而言, 充电功率对线路电压影响虽然大于2 km线路, 但是也处于允许范围内; 仅在负载率低至5%时, 4 km线路将会出现无功倒送, 需通过感性无功补偿设备进行无功调节。

## 2 变电站无功分析

### 2.1 变电站参数及计算模型

针对变电站出线情况, 设置线路的不同负载率组合, 以期作为变电站无功需求分析的基础。变电站电路模型如图2所示。不同情况下的负荷参数分布表如表6所示。

### 2.2 变电站无功功率分布研究

根据图2中的计算模型可知, 该模型中所有电气元件均为线性元件, 故可使用叠加定理。根据表6中负载率分布的不同情况, 对表2及表4中2 km和4 km单条线路的潮流分布计算结果应用叠加定理,

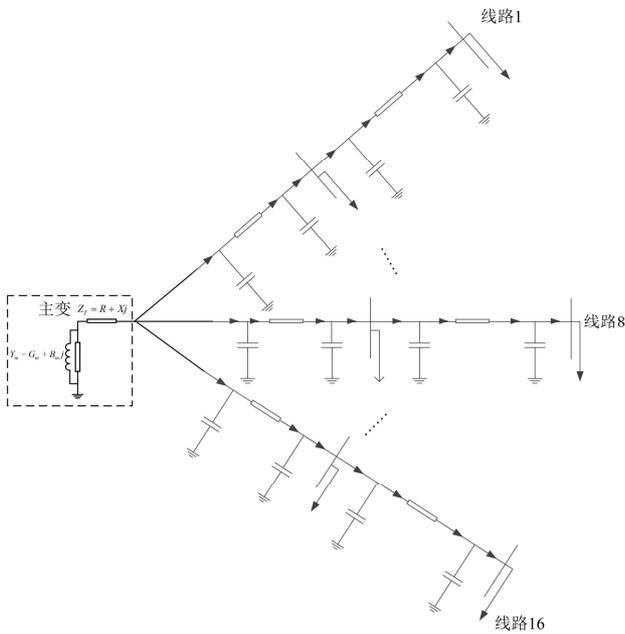


图 2 变电站电流计算模型

Fig. 2 Calculation model of transformer substation

表 6 变电站负荷分布情况表

Table 6 Load distribution in transformer substation

负载率分布情况	各种负载率线路条数				
	5%	10%	20%	40%	60%
1	16	0	0	0	0
2	0	0	16	0	0
3	0	0	8	4	4
4	8	0	8	0	0
5	8	0	0	0	8
6	0	0	8	8	0
7	0	8	0	8	0
8	2	4	4	4	2

即可得变电站所有出线电缆长度均为 2 km 和 4 km 时表 7、表 8 所示变压器端潮流分布情况。其中： $U_{\max}$  为电缆线路末端的最高电压； $U_{\min}$  为电缆线路末端的最低电压； $\gamma_{\max}$  为末端的最大电压偏差率。当变电站所有线路长度增加为 4 km 后，与单条线路情况一样， $\sum P$  及  $\sum Q_{LD}$  均未发生明显变化，而  $\sum Q_B$ 、 $\sum Q_L$  则变为线路均为 2 km 时变电站的两倍，故此处不再赘述。 $\sum Q$ 、 $U_{\max}$ 、 $U_{\min}$ 、 $\gamma_{\max}$  三个参数的变化如表 8 所示。

在此基础上，类比于单条线路的  $k$  值分析，对变电站内所有电缆线路的充电功率占变电站无功负荷之比进行研究，具体结果如表 9 所示。

由表 9 中的数据可知，针对表 6 中的变电站负载率情况，仅在变电站出线电缆长度均为 4 km，且

所有线路负载率均低至 5% 时，变电站才可能出现无功倒送情况。而同一变电站内同时出现多条如此低负载率的线路，在青岛电网很难出现。故从该角度分析无需在变电站内加装感性无功补偿设备。

表 7 出线电缆长度均为 2 km 变电站潮流分布

Table 7 Power flow distribution in transformer substation when the length of all outgoing cables are 2 km

负载情况	$\sum Q$	$\sum Q_L$	$\sum Q_B$	$\sum Q_{LD}$
1	0.53	0.002	1.284	1.82
2	6.01	0.026	1.284	7.27
3	11.53	0.098	1.284	12.72
4	3.27	0.014	1.284	4.54
5	10.65	0.119	1.284	11.81
6	9.68	0.065	1.284	10.90
7	7.86	0.056	1.284	9.09
8	8.09	0.064	1.284	9.31

表 7 续 出线电缆长度均为 2 km 变电站潮流分布

Table 7 Continued Power flow distribution in transformer substation when the length of all outgoing cables are 2 km

负载率	$\sum P$	$U_{\max}$	$U_{\min}$	$\gamma_{\max}$
1	5.53	10.49	10.49	4.9%
2	22.15	10.48	10.48	4.8%
3	38.84	10.48	10.43	4.8%
4	13.84	10.49	10.48	4.9%
5	36.11	10.49	10.43	4.9%
6	33.27	10.48	10.43	4.8%
7	27.72	10.49	10.45	4.9%
8	28.43	10.49	10.43	4.9%

表 8 出线电缆长度均为 4 km 变电站潮流分布

Table 8 Power flow distribution in transformer substation when the length of all outgoing cables are 4 km

负载率	$\sum Q$	$U_{\max}$	$U_{\min}$	$\gamma_{\max}$
1	-0.75	10.49	10.49	4.9%
2	4.75	10.45	10.45	4.8%
3	10.35	10.45	10.36	4.8%
4	2.00	10.49	10.45	4.9%
5	9.48	10.49	10.36	4.9%
6	8.46	10.45	10.36	4.8%
7	6.63	10.48	10.41	4.9%
8	6.87	10.49	10.36	4.9%

对于末端电压而言，由表 7 及表 8 中数据可知，主要影响因素为线路负载率。各类负载率的线路末端电压均呈现下降趋势，而未出现由于容性无功过剩而引起的电压升高情况，且最大电压下降也未达

到额定参数的 7%，故考虑电压因素也无需对以上情况进行无功补偿。

表 9 线路总充电功率占变电站无功总负荷比例

Table 9 Charging power proportion of total reactive load in transformer substation

负载情况	L=2 km	L=4 km
1	0.706	1.411
2	0.176	0.351
3	0.100	0.199
4	0.282	0.562
5	0.108	0.213
6	0.117	0.233
7	0.140	0.279
8	0.137	0.272

### 3 结论

本文在基准电压为 10.5 kV、负荷功率因数控制在 0.95、不加装感性无功设备的情况下，针对以 10 kV 电缆出线(长度分别为 2 km 和 4 km)为主的青岛典型变电站(16 条馈线)进行了分析。分析结论如下：

(1) 对于不同负载率和不同线路长度的单条线路，末端电压均低于首端电压，且电压偏差均小于规程规定的 7%限值。

(2) 单条电缆线路在负载率处于 60%以下时整体呈现无功电源特性，但相对于线路无功负荷而言仍旧只占较小比例，仅在线路 4 km 且负载率低至 5%时出现无功倒送情况。

(3) 若变电站出线均为 2 km 的电缆情况，对于不同负载率线路组合的变电站而言，电缆出线对变电站整体无功功率的影响比较有限，未能构成无功功率倒送，而且线路末端电压偏差也较小。

(4) 若变电站出线均为 4 km 的电缆情况，对于不同负载率线路组合的变电站而言，虽然电缆充电功率明显增大，但各条线路的电压偏差均在有限范围内，故全站也不存在电缆线路末端电压超过规程限制的情况。由潮流计算结果可知，当 16 条出线负载率均低至 5%时可能出现无功倒送，但根据青岛电网目前负载情况，几乎不存在变电站内多条电缆线路同时负载率低于 10%的情况。

(5) 根据以上分析结论可知：电缆线路对以青岛配网为代表的城市配网无功影响并不大，未能引起电缆末端电压升高，亦无需在变电站内增加感性无功补偿设备对电缆的充电功率进行补偿。

### 参考文献

- [1] 罗书克, 张元敏. 低压配用电系统两级无功补偿控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 103-107.  
LUO Shuke, ZHANG Yuanmin. Study of two-stage VAR compensation in low voltage distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 103-107.
- [2] 曾嘉俊, 刘志刚, 何士玉, 等. 一种基于子区域粒子群的无功优化算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 37-42.  
ZENG Jiajun, LIU Zhigang, HE Shiyu, et al. Study of the reactive power optimization based on sub-region particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 37-42.
- [3] 周攀, 范旭娟, 肖潇, 等. 基于改进算子的免疫遗传算法的电压无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 110-115.  
ZHOU Pan, FAN Xujuan, XIAO Xiao, et al. Voltage and reactive power optimization based on immune genetic algorithm of improved operator[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 111-115.
- [4] 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.
- [5] 刘健, 段璟靓. 配电网极限线损分析及降损措施优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 27-35.  
LIU Jian, DUAN Jingjing. Line loss limitation analysis and optimal planning of loss reduction for distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 27-35.
- [6] 傅军栋, 喻勇, 黄来福. 不平衡负载的一种更加经济的补偿方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 126-132.  
FU Jundong, YU Yong, HUANG Laifu. A more economical compensation method for unbalanced load[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 126-132.
- [7] 方景辉, 温镇. 分布式光伏就地自适应电压控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 49-55.  
FANG Jinghui, WEN Zhen. Research on local adaptive voltage control strategy based on distributed PV[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 49-55.

- [8] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.  
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [9] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.  
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [10] 王金凤, 包毅, 程跃森, 等. 城市配电网电容电流补偿研究[J]. 郑州大学学报, 2012, 33(4): 69-72.  
WANG Jinfeng, BAO Yi, CHENG Yuesen, et al. Compensation for capacitive current in urban distribution network[J]. Journal of Zhengzhou University, 2012, 33(4): 69-72.
- [11] 韩祯祥. 电力系统分析[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2005.
- [12] GB/T 12325-2008 电能质量-供电电压偏差[S].
- [13] 毕琳. 电网低谷时段无功倒送问题解决方法[C] // 2011年云南电力技术论坛论文集, 2011: 253-256.  
BI Lin. Solution of reactive power releasing in low electric valley period[C] // Collected papers of BBS on Yunnan Electric Power Technology, 2011: 253-256.

收稿日期: 2015-08-20; 修回日期: 2015-10-03

作者简介:

杨继超(1985-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为变电站设计及电力系统潮流计算工作; E-mail: yangjichao12@126.com

李文升(1978-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统保护与控制;

韩颖(1971-), 女, 本科, 高级工程师, 研究方向为变电站二次系统设计。

(编辑 葛艳娜)