

青岛配电网低压并联电抗器配置必要性研究

当前青岛城区配电网中变电站出线的电缆化率已达到较高水平，由于电缆线路的充电功率远大于架空线路，因此部分变电站在负荷低谷时期将可能造成配电线路末端电压偏高以及无功倒送情形的出现。本文根据青岛配电网情况，对不同负荷下单条电缆出线和多条电缆出线分别建立电路模型进行计算，并针对计算结果进行分析。最后，针对是否需要在变电站内增加并联电抗器进行感性无功补偿提出结论，为工程设计提供参考。

杨继超 李文升 韩颖 赵颖/青岛供电公司

0 引言

配电线路按结构可分为两类：架空线路和电缆线路。随着国民经济和城镇建设的快速发展，架空线路路径受环境影响越来越大。加上电缆线路具有受环境影响小、安全性好、供电可靠性高、美化城市环境等一系列优点，其已逐渐取代架空线成为配电线路的主要组成，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容性无功过剩，从而使低谷负荷时配网可能出现无功倒送，且由于节点无功平衡决定了该点电压水平，故无功过剩还可能导致末端电压升高^[1-4]。

目前，青岛城区配电网中变电站出线的电缆化率也已达到较高水平，因此在负荷低谷时期将可能造成配电线路无功倒送，极端条件下还可能导致末端电压偏高。故而，针对青岛配电网的网架结构与所供负荷进行调研，通过构建理论模型来对各类出线与负荷条件下变电站的末端电压及系

统潮流情况进行分析十分必要。由于经济限制，当前山东地区几乎全部采用在低压侧安装并联电抗器的方式^[5]，对正常运行时的容性无功进行补偿，从而有效防止电缆末端电压升高和无功倒送等问题^[6]。

1 单条线路无功分析

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。其中线路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。

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，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。

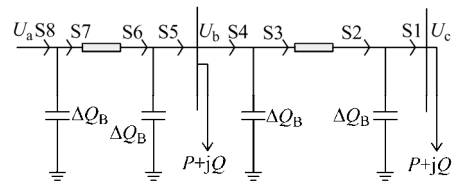


图 1 单条电缆线路潮流计算模型



杨继超/工程师

关键词/Keywords

并联电抗器 ·
电缆 ·
潮流计算 ·
无功补偿 ·

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

$$P = \frac{1}{2} UI_{\max} \cos \varphi \eta \tag{1}$$

$$Q = \frac{1}{2} UI_{\max} \sin \varphi \eta \tag{2}$$

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; $I_{\max}$ 为线路载流量; φ 为负荷的功率因数角; η 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^[7], 该方法收敛性很强, 计算速度快, 计算结果准确性高。

2.3 2 km 线路潮流计算结果

由表 1 可知线路参数, 对应针对线路负载率分别位于 5%、10%、20%、40%、60%和 80%等 6 种情况, 利用上述模型进行潮流计算。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	1297.45	14.81	80.26
80	3660.31	106.18	80.26

负载率/(%)	$\sum Q_{LD}$	$\sum P$	U_c	γ
5	113.57	345.68	10.49	4.9%
10	227.15	691.66	10.49	4.9%
20	454.30	1384.50	10.48	4.8%
40	908.60	2773.75	10.45	4.5%
60	1362.90	4167.78	10.43	4.3%
80	3634.39	11209.74	10.31	3.1%

表中, $\sum Q$ 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; $\sum Q_{LD}$ 为线路的总无功负荷, kVar; γ 为末端电压偏差率。且数据有如下关系

$$\sum Q + \sum Q_B = \sum Q_{LD} + \sum Q_L \tag{3}$$

$$\sum Q_{LD} = 2Q \tag{4}$$

$$\gamma = \frac{U_c - U_N}{U_N} \tag{5}$$

本文中其他表格中变量, 均与表 1 中具有类似定义和数学关系, 后文不再赘述。

通过表 2 的数据可知, 随着负载率的变化, $\sum Q_B$ 值不变, 线路的总无功损耗 $\sum Q_L$ 和线路首端输出总的有功功率 $\sum Q$ 和无功功率 $\sum P$ 都随之变化。

单条 10 kV 电缆线路的充电功率约 80.26 kVar 在负载率为 5%~60%时电缆的充电功率均大于线路的无功损耗, 故其作为无功电源向外输送无功。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。

从电压角度来看, 相对于线路首端的电压 10.5 kV 而言, 线路末端电压下降均在 0.01~0.19 kV 的范围之内, 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^[8]。

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, 记为

$$k = \frac{\sum Q_B}{\sum Q_L + \sum Q_{LD}} \tag{6}$$

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)

$k/(%)$	5	10	20	40	60	80
值	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 <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。

因此根据无功潮流计算结果, 当电缆出线为 2 km 时, 无需在母线上并联电抗器对无功负荷进行调节。

2.4 4 km 线路潮流计算结果

针对线路负载率分别位于 5%、10%、20%、40%、60%和 80%等 6 种情况, 利用上述模型进行潮流计算。对应线路长度为 4 km 时, 得到潮流分布结果如表 4 所示。

表 4 10 kV 电缆潮流分布 (4 km)

负载率/ (%)	$\sum Q$	$\sum Q_L$	$\sum Q_B$
5	-46.76	0.19	160.52
10	67.39	0.77	160.52
20	296.95	3.18	160.52
40	761.05	12.98	160.52
60	1231.83	29.46	160.52
80	3686.63	212.76	160.52

负载率/ (%)	$\sum Q_{LD}$	$\sum P$	U_c	γ
5	113.57	345.81	10.49	4.9%
10	227.15	692.19	10.48	4.8%
20	454.30	1386.73	10.45	4.5%
40	908.60	2782.97	10.41	4.1%
60	1362.90	4188.78	10.36	3.6%
80	3634.39	11362.66	10.10	1.0%

表 4 中列出了在几种不同负载率下的潮流计算结果。具体各列数值示意与表 2 相同。同样,随着负载率的变化, $\sum Q_B$ 值不变,线路的无功损耗 $\sum Q_L$ 和线路首段输出总的有功 $\sum Q$ 和无功 $\sum P$ 都随之变化。

单条中压电缆线路的充电功率约 160.52 kVar 在负载率为 5%~60%时电缆的充电功率均大于线路的无功损耗,故其作为无功电源向外输送无功。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。

从电压角度来看,相对于线路首端的电压 10.5 kV 而言,线路末端电压并未因电容充电功率过大而出线电压升高,而产生了小幅度的电压下降,且随负荷的增加,线路末端电压下降也随之增大,但末端电压最大偏移未超过标称电压的 7%,故无需进行无功补偿。

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)

$k/ (%)$	5%	10%	20%	40%	60%	80%
值	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,未构成无功倒送。但当负载率低至 5%时, k 值达到 1.41,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,故电缆线路向

电源倒送无功。线路充电功率相当于无功负载的 140%左右,已经构成了无功倒送的条件。这也与表 4 中 5%负载率所对应的线路首端无功功率为-46.76 kVar 的结论一致。

因此根据无功潮流计算结果,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^[9],需要采用并联电抗器在负载率很低的情况进行无功调节。

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,充电功率对线路的潮流和电压影响均在有限范围内,不必装设感性无功。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;当负载率低至 5%时,4 km 线路将会出现无功倒送,需通过并联电抗实现无功平衡。

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,以期作为变电站感性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。

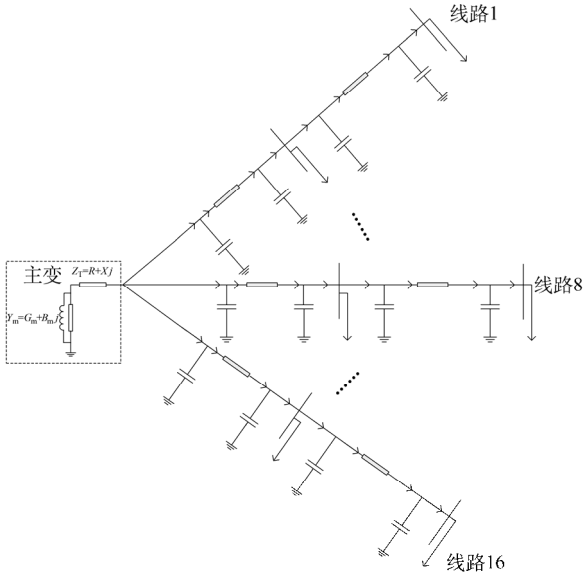


图 2 变电站电流计算模型

表 6 变电站负荷分布情况表

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

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即可得变电站所有出线电缆长度均为 2 km 和 4 km 时变压器端潮流情况，如表 7、表 8 所示。

表 7 出线电缆长度均为 2 km 变电站潮流分布

负载情况	$\sum Q$	$\sum Q_L$	$\sum Q_N$	$\sum Q_{LD}$
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

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

由表 7 及表 8 中数据可知对于末端电压而言，主要影响因素为线路负载率，由于各类负载

率的线路末端电压均呈现下降趋势，而未出现电压升高情况，且最大电压下降也未达到额定参数的 7%，故单纯考虑电压因素无需对以上情况进行无功补偿。

表 8 出线电缆长度均为 4 km 变电站潮流分布

负载情况	$\sum Q$	$\sum Q_L$	$\sum Q_N$	$\sum Q_{LD}$
1	-0.75	0.003	2.568	1.82
2	4.75	0.051	2.568	7.27
3	10.35	0.195	2.568	12.72
4	2.00	0.027	2.568	4.54
5	9.48	0.237	2.568	11.81
6	8.46	0.129	2.568	10.90
7	6.63	0.110	2.568	9.09
8	6.87	0.127	2.568	9.31

负载率	$\sum P$	U_{max}	U_{min}	$\gamma_{max}/(\%)$
1	5.53	10.49	10.49	4.9
2	22.19	10.45	10.45	4.5
3	38.98	10.45	10.36	4.5
4	13.86	10.49	10.45	4.9
5	36.28	10.49	10.36	4.9
6	33.36	10.45	10.36	4.5
7	27.80	10.48	10.41	4.8
8	28.52	10.49	10.36	4.9

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。

表 9 线路总充电功率占变电站无功总负荷比例

负载情况	$L=2\text{ km}$	$L=4\text{ km}$
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

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

现多条如此低的负载率的线路,在青岛电网很难出现。故从该角度分析也无需在变电站内加装并联电抗器。

3 结束语

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的比例,仅在线路 4 km 且负载率低至 5%时出现无功倒送情况。

3) 对于变电站所有出线均在 2 km 情况则对于不同负载率线路组合的变电站而言,由于单条线路的无功分布与电压偏差均在有限范围内,电缆出线对变电站整体无功功率的影响也比较有限,故不仅不能构成无功功率倒送的条件,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,由于单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。但由潮流计算结果可知,当 16 条出线负载率均低至 5%时可能出线无功倒送,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%情况,故根据本文的分析结论,无需在变电站内增加并联电抗器。

参考文献

- [1] 方欢欢,舒欣梅,陈彬.我国中压动态无功补偿装置的发展及展望[J].电子应用技术,202,38(8):79-85.
- [2] 骆敏,祝达康,徐敬友,等.电缆运行对电力系统电压的影响及其对策[J].供用电,2006,23(2):7-10.
- [3] 朱罡.电力系统静止无功补偿技术的现状及发展[J].电力电容器,2001,4:31-34.
- [4] 章正国,郁单,徐英,等.大长度高电压海底电缆的无功补偿设计研究[J].电力电容器与无功补偿,2010,31(6):32-38.
- [5] 沙志成,徐大鹏,赵兰明.山东电网无功配置规划及优化方案的研究[J].电气应用,2011,30(18):28-30.
- [6] 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.
- [7] 韩祯祥.电力系统分析[M].杭州:浙江大学出版社,2005.
- [8] GB/T 12325—2008.电能质量-供电电压偏差[S].
- [9] 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年云南电力技术论坛论文集,2011,253-256.

作者简介

杨继超(1985-),男,硕士研究生,工程师,主要从事变电站二次设计,电力系统潮流计算等工作。

(收稿日期:2015-12-10) EA
(编辑:朱金凤)