

# 综合考虑自励磁和工频过电压的小电网 联络线无功补偿优化策略

张 华 李 旻 丁理杰

(四川电力科学研究院 四川 成都 610072)

**摘 要:** 结合理论研究和仿真分析,探讨弱联系小受端电网联络线充电无功的补偿策略,阐述了分别考虑自励磁和工频过电压进行联络线无功补偿,将有可能导致电网运行电压不满足要求的缺陷。并提出一种综合考虑自励磁和工频过电压的无功补偿优化策略。最后通过一个仿真实例说明优化策略的效果。

**关键词:** 地方电网; 自励磁; 工频过电压; 高压电抗器; 无功补偿

**Abstract:** The theoretical research and simulation analysis are combined to investigate the reactive power compensation strategy for the transmission line which contacts the system and a small end grid. The traditional reactive power compensation strategy of contact line respectively considering the self-excitation and power-frequency overvoltage is described which will likely lead the voltage does not meet the requirements of grid operation. So an optimization strategy comprehensively considering the self-excitation and power-frequency overvoltage is proposed. Finally, a numerical example is provided to prove its effects of the optimization strategies.

**Key words:** local grid; self-excitation; power-frequency overvoltage; high-voltage reactor; reactive power compensation

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)03-0015-04

## 0 引 言

随着西部开发战略的深入推进,西部地区电网发展也稳步前行。四川电网的主网架逐步向经济发展滞后的偏远地区延伸,如甘孜、阿坝、凉山地区等。在这些地区建设高电压等级的联络线,把地方电网与四川主网连接起来,解决当地长期存在的缺电少电问题,有利于改善当地民生,促进经济发展和民族团结。

然而由于当地人口分布稀疏,负荷需求有限,且由于自然条件恶劣,不具备建设密集电网的条件。这些地区联网后将形成众多弱联系末端电网。同时为了利用当地资源,网内常常含有小型水电机组,其典型电网结构如图1所示。但网内的水电机组不足以支撑当地

负荷,因此仍需要通过联络线获得电力供应。

这类电网的特点决定了其必然存在一些安全稳定问题,其中典型的问题有:小型发电机自励磁、长线路工频过电压等。这两个问题的根源都来自于长线路的充电无功。目前长线路充电无功补偿策略的制定是将自励磁和工频过电压分别考虑的,这里将阐述这种方法的缺陷,并提出一种综合考虑自励磁和工频过电压的弱联系小电网联络线无功补偿优化策略。

## 1 联络线无功补偿的一般策略

按照补偿对象的不同,高压电抗器的结构有许多种,但实际应用最多的是如图1所示的结构<sup>[1]</sup>。其中  $X_a = X_b = X_c = X_p$  是高压电抗器的值,  $N$  为高压电抗器中性点,  $X_N$  为中性点小电抗的值。正常运行时,若三相绝对对称,  $N$  点电压为零,  $X_N$  上没有电流流过。中性点小电抗只在暂态过程中发挥作用。

输电线路安装并联高压电抗器通常有两个目的:其一是根据系统无功就地补偿的原则,对输电线路充电无功进行补偿,其目的是防止系统稳态电压

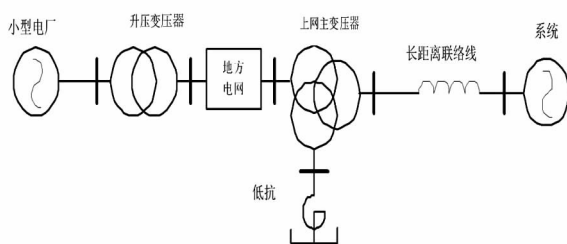


图1 小电厂接入地方电网典型系统结构图

过高,以及防止线路操作过程中产生过高的工频过电压。其二是采用中性点小电抗与高压电抗器配合,降低三相线路之间的耦合作用,从而降低单相重合闸操作过程中产生的潜供电流和恢复电压,促进电弧的快速熄灭且不重燃弧,保证单相重合闸成功<sup>[2,3]</sup>。

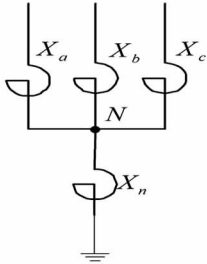


图2 线路高压电抗器结构

表1 线路充电无功经验值

电压等级/kV	110	220	500
每100 km 线路充电无功/Mvar	3	19	120

上述两个目的也同时成为确定高压电抗器参数的约束。第一个目的将对高压电抗器容量的大小,以及高压电抗器安装的位置构成约束。单位长度的某电压等级输电线路空载充电无功通常可以通过表1中的经验值计算。一般高压电抗器的补偿度约为60%~70%。而线路的工频过电压水平则需要采用系统仿真的方式获得。按照标准要求,应该校核输电线路无故障甩负荷、单相重合闸甩负荷两种工况下的工频过电压水平,并采取措施保证其在规定数值以下。工频过电压的限定值如表2所示<sup>[4,5]</sup>。通过仿真分析可以确定线路哪一侧的工频过电压超标,从而确定高压电抗器的安装位置。

表2 线路工频过电压允许上限

电压等级/kV	110 kV		220 kV		500 kV	
工频过电压 /p. u.	线路	母线	线路	母线	线路	母线
	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4

第二个目的将对高压电抗器中性点小电抗的数值构成约束。在高压电抗器容量已定的前提下,采用仿真的方法可以优化中性点小电抗的数值<sup>[2,3]</sup>,使线路的潜供电流最小。对高压电抗器中性点小电抗的优化不在这里讨论范围内。

## 2 一般补偿策略带来的问题

### 2.1 地方小电网联络线的特点

通常输电线路单相接地甩负荷工频过电压高于无故障甩负荷,而单相接地甩负荷工频过电压的大小与该故障点  $X_0/X_1$  的大小有关<sup>[2]</sup>,其中  $X_0$ 、 $X_1$  分别为该点的零序综合电抗和正序综合电抗。将比值定义为  $k_X$ ,其值越大,过电压越大。

如图3所示,假设系统的零序电抗为  $X_{s10}$ ,正序电抗为  $X_{s11}$ ,地方小电网的零序电抗为  $X_{s20}$ ,正序电抗为  $X_{s21}$ 。联络线本身的零序电抗为  $X_{l0}$ ,正序电抗为  $X_{l1}$ 。则联络两端发生接地故障,接地点的  $k_X$  值的大小如式(1)和式(2)。



图3 地方电网联络线示意

$$\text{联络线系统侧故障: } k_X = \frac{X_{s20} + X_{l0}}{X_{s21} + X_{l1}} \quad (1)$$

$$\text{联络线地方电网侧故障: } k_X = \frac{X_{s10} + X_{l0}}{X_{s11} + X_{l1}} \quad (2)$$

通常,输电线路的  $X_{l0}$  是  $X_{l1}$  的 2.5~3 倍<sup>[6]</sup>,而由于发电机和变压器的存在,系统的零序电抗和正序电抗的比值却小得多。因此有式(3)。

$$\frac{X_{s0} + X_{l0}}{X_{s1} + X_{l1}} < \frac{X_{l0}}{X_{l1}} \quad (3)$$

其中  $X_{s0}$ 、 $X_{s1}$  分别为系统零序和正序电抗。也就是说系统阻抗会拉低故障点的  $k_X$  值。系统越强,系统阻抗越小,拉低效果越弱,  $k_X$  值越大,相应的工频过电压也越大。

图3所示系统最主要的特点就是线路两端的两个系统强弱程度差别巨大。主网系统的强度远远高于地方电网,因此线路的地方电网侧发生单相故障甩负荷产生的工频过电压通常比另一端大。因此线路高压电抗器应该安装在地方电网一侧。

### 2.2 抑制地方电网自励磁对无功补偿的要求

若地方电网内含有小型同步发电机,则为了避免发生自励磁,需要对线路充电无功进行充分补偿。根据普遍接受的自励磁容量判据,系统不发生自励磁需满足式(4)的条件<sup>[7,8]</sup>。而考虑到地方电网内机组容量太小,对系统参数敏感度太高,以及系统频率升高对自励磁的影响,建议采用更为严格的判据,如式(5)。其含义是当系统频率上升到 1.1 p. u. 时,仍能保证对线路充电无功的过补偿,没有富裕无

功注入发电机。

$$S_n > X_d^* Q_c \quad (4)$$

$$Q_l / 1.1 > 1.1 Q_c \quad (5)$$

其中,  $S_n$  是发电机容量;  $X_d^*$  是计及变压器、线路电抗的发电机同步电抗的标么值;  $Q_l$  是感性无功补偿容量;  $Q_c$  是线路充电无功。

### 2.3 系统的稳态调压问题

如前所述,为了防范自励磁,感性无功补偿量应为联络线充电功率的1.21倍,而线路高压电抗器的补偿度通常为60%~70%,剩余的部分将通过在地方电网变压器低压侧配置低压电抗器的方式实现。

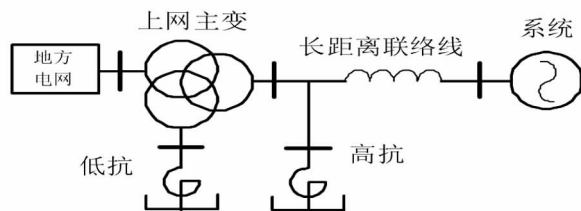


图4 地方电网感性无功集中配置图

如图4,若线路高压电抗器也安装在地方电网一侧,将造成感性无功设备集中布置的局面。稳态运行时,由于地方小电网发电机容量太小,无功发电能力有限,发出的无功无法与上述感性无功相平衡,因此需要通过联络线从系统侧引入大量无功。从而导致联络线两端产生很大的电压损耗。

根据电力系统基础理论,输电线路两端的电压损耗可以用式(6)描述<sup>[6]</sup>。

$$\Delta U^* = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} \quad (6)$$

其中  $P_2$ 、 $Q_2$ 、 $U_2$  分别为线路同一侧的功率和电压,  $R$ 、 $X$  为线路阻抗。

为了使读者有感性认识,给出范例如下:长度为250 km的220 kV线路,导线型号为单400 mm。 $X \approx 75$   $R \approx 9.5$   $Q_c \gg 48$  Mvar,按照上述理论  $Q_l$  需大于58 Mvar。当线路传输最大热稳定允许功率(约为27 MW)时,线路的电压损耗可达13 kV。当线路送端电压为230 kV时,受端电压低至217 kV,不满足220 kV系统的最低运行电压限制。且电压等级越低,线路电压损耗越严重。

## 3 联络线补偿策略优化

首先研究抑制线路工频过电压需要投入的高压电抗器的大小。构建如图5所示仿真系统,线路参

数和传输功率大小同2.3节范例。在联络线的地方小电网侧设置单相接地故障,故障0.12 s后断路器B2跳三相。故障持续0.2 s消失。改变高压电抗器的补偿度,线路末端的工频过电压水平如图6所示。

由图6可见,没有高压电抗器时,工频过电压为1.38 p.u.。逐步增大高压电抗器补偿度至20%,线路的工频过电压即可被限制在1.3 p.u.以内。从图中还可以看出,工频过电压和高压电抗器补偿度基本成线性关系。

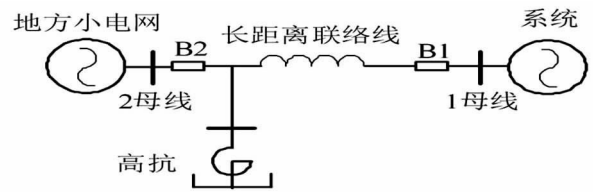


图5 仿真模型结构图

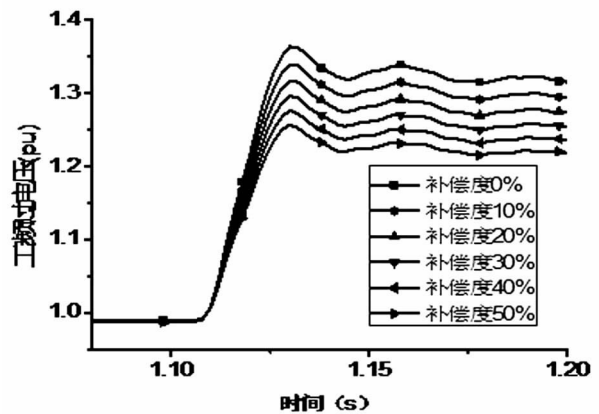


图6 不同高压电抗器补偿度时工频过电压的波形

因此从限制工频过电压的角度来看,根本不需要高压电抗器容量达到线路充电功率的60%~70%。因此可采用线路两端均配置高压电抗器的做法使感性无功布置分散,如图7。

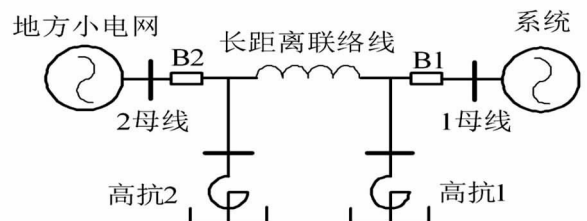


图7 线路两端配置高压电抗器的策略

需要说明的是,大量文献均提出了线路两端装设高压电抗器的补偿方法。但是这些文献的依据,仍然是线路的工频过电压水平。当线路两侧的工频过电压水平均超标时,才会在两侧都布置高压电抗器。而方法是综合考虑自励磁和稳态调压特性的需要提出来的,与线路另一侧的工频过电压无关。

显然,提出上述方法后的下一个任务就是确定这两个高压电抗器的容量配合。如上所述,高压电抗器2的容量需要通过系统仿真来确定。逐步增大高压电抗器2的补偿度直至线路的工频过电压下降到1.3 p.u.以下即可。如图6,建议取高压电抗器2的补偿度为20%,此时的工频过电压约为1.29 p.u.。高压电抗器1的大小由线路的总补偿容量与高压电抗器2的容量之差决定。为了达到更好的分散无功的效果,建议将线路的总补偿度设为70%。

#### 4 仿真实例

本节给出一个仿真实例来证明上述优化配置的效果。仍采用上述典型系统结构和参数,即220 kV线路长250 km,导线型号为单400 mm,输送潮流27 MW。优化前和优化后的系统结构和参数如图8所示。优化前后系统的稳态电压如表3所示。可见优化方案大幅提高了受端电网的电压,使其可满足电压运行曲线的要求。

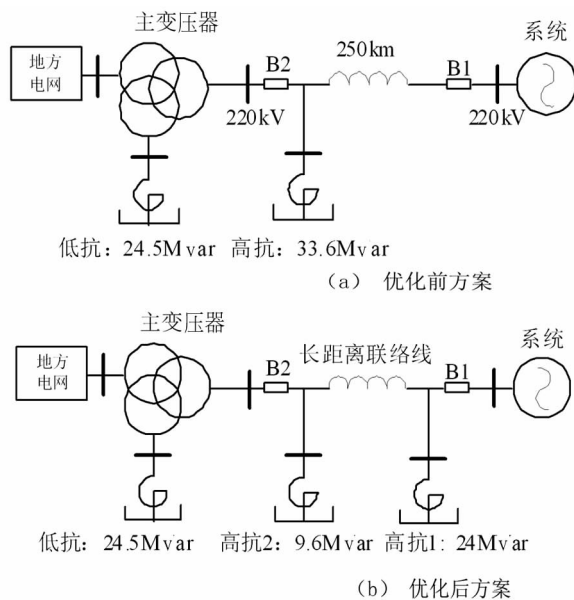


图8 优化前后方案

表3 线路工频过电压允许上限

母线等级/kV		系统母线	地方电网 220 kV 母线
电压有效值 /kV	优化前	229.8	217.0
	优化后	229.8	225.3

#### 5 结论

针对一种普遍存在于西部地区的弱联系地方受端电网,研究其联络线高压电抗器补偿策略。揭示了常规补偿方法分别以抑制线路工频过电压为目的配置联络线高压电抗器,以防范自励磁为目的决定总无功补偿容量的做法带来的系统运行电压不满足运行要求的问题。针对此问题提出了一种综合考虑自励磁、工频过电压和系统稳态调压特性的感性无功优化配置方法,该方法可大幅提高受端电网的电压,使其满足运行要求。对于西部偏远地区受端电网的联网工程规划和设计具有重要的借鉴意义。

#### 参考文献

- [1] 刘海军,韩民晓,文俊.特高压双回线路并联电抗器中性点小电抗的优化设计[J].电力自动化设备,2009,29(11):87-91.
- [2] 电力工业部电力规划设计总院.电力系统设计手册[M].北京:中国电力出版社,1995.
- [3] 田庆.特高压工程高压电抗器中性点绝缘水平及小电抗选择[J].高电压技术,2009,35(3):475-479.
- [4] DL/T 620-1997,交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].
- [5] 国家电网公司.电力系统安全稳定导则[S].
- [6] [加]PRABHA KUNDUR 著,周孝信等译.电力系统稳定与控制[M].北京:中国电力出版社,2001.
- [7] 陈珩.同步电机运行基本理论及计算机算法[M].北京:水利电力出版社,1990.
- [8] 程时杰,曹一家,江全元.电力系统次同步振荡的理论与方法[M].北京:科学出版社,2009.

#### 作者简介:

张 华(1985),男,硕士,主要研究方向为电力系统分析与控制;

李 旻(1970),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分析与控制;

丁理杰(1981),男,博士研究生,主要研究方向为电力系统分析与控制。

(收稿日期:2013-01-16)