

串联补偿装置接入后超特高压交流线路 输送功率修正方法

刘佳钰

(西安交通大学 陕西 西安 710049)

摘要:超特高压交流输电系统是中国远距离、大容量输送电能的重要方式。为了提升超特高压输电线路的输送能力,在交流长线路两侧常会加装串联补偿装置等补偿设备。然而,实际工程中却发现,在装设补偿设备后,由于线路的电流互感器和电压互感器安装点分别布置在补偿装置两侧,传统的线路输送功率计算方法无法准确获取线路传输的功率,进而导致变电站监控系统判定母线功率不平衡的状况时有发生。为了解决上述问题,基于线路潮流计算方法,定量分析了补偿装置的引入引发交流线路功率计算不准的原因,推导了功率修正算法。简单算例及西部某变电站的500 kV 输电线路算例验证了算法的准确可靠。该方法简单易行,易于在超特高压变电站中实施应用。

关键词:输送功率;线路串联补偿;潮流计算;修正计算;超特高压交流输电

Abstract: Ultra high voltage(UHV) /extra high voltage(EHV) AC transmission system is an essential approach for the power transmission with long distance and large capacity in China. In order to improve the transmission capacity of UHV/EHV transmission lines, both sides of AC long lines will be equipped with series compensation devices or other compensation equipment. However, it is found in actual engineering projects that after the installation of compensation equipment the probability of identifying the bus power imbalances by the substation monitoring system rises up, which is caused by the fact that the line current transformers and voltage transformers are respectively arranged on the different sides of compensation devices. In order to solve these problems, the reasons for the miscalculation of transmission line power are analyzed and a modified calculation method is deduced based on power flow calculation method. A simple calculation example and an actual example of 500 kV transmission lines of a substation in the west area prove that the proposed algorithm is accurate and reliable. This method is simple and easy to be applied in UHV/EHV substations.

Key words: transmission power; line series compensation; power flow calculation; modified calculation method; EHV/UHV AC transmission

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)01-0042-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.01.009

0 引言

超特高压交流输电是中国实施电能远距离、大容量传输的重要方式,是实施“西电东送”战略的核心技术。因此,采用新技术来提升超特高压交流输电的输送容量、减小远距离输电带来的电容效应等问题一直都是工业界和学术界关注的重点。目前国内外采取的主要技术有输电线路安装串联电容补偿装置和高压并联电抗器等。

现有的运行经验表明,串联补偿(以下简称串补)技术是提高远距离输电系统传输容量、改善系统稳定性的一种经济且有效的方法。通过在输电线中间加入串联电容器能减小线路电抗,缩小线路两

端的相角差,从而获得较高的稳定裕度及传输较大的功率^[1]。目前将晶闸管技术引入串联补偿装置中,诸如 TCSC、SSSC 等新型装置性能更优,可以实现平滑调节,进一步提高传输容量和暂态稳定极限;此外在稳态潮流控制、改善电压质量、降低网损、限制短路电流、抑制次同步振荡、阻尼低频振荡、提高电力系统与电压稳定性等方面发挥了重要作用^[2-5]。

并联电抗器在电力系统中广泛地应用于限制工频过电压、消除发电机自励磁、限制操作过电压、线路容性充电功率、潜供电流抑制、限制短路电流和平波等^[6-8]。然而在超特高压线路充电功率大,限制过电压和无功补偿矛盾突出,可控高压并联电抗器能有效解决这个问题,通过动态补偿输电线路过剩

的容性无功功率,有效地抑制超高压输电线路的容升效应、操作过电压、潜供电流等现象,降低线路损耗,提高了系统静态和动态稳定性,提高电压稳定水平及线路传输功率,提高电网运行效益^[7-9-11]。

串补装置和高压并联电抗器在超高压输电中发挥了重要作用,然而在实际工程中却给测量方面带来了许多问题。由于线路增加了串联补偿装置后,在串补装置母线侧加装电压互感器会引发谐振并烧毁电压互感器,故含串补线路的电压互感器往往装设在串补的线路侧。但由于线路的电流互感器依然装设在串补母线侧,因此传统功率计算方法难以准确获得线路上传输的无功功率^[12]。特别地,当输电线路同时装设串补及高压并联电抗器后,甚至导致有功的计算结果发生明显偏差,对电网的在线监测提出了重大的挑战。

针对上述问题,基于基尔霍夫定律,提出一种针对含串联补偿线路的输送功率校正算法;通过简单的潮流计算实现有功功率和无功功率的修正,得到准确的功率计算值。计算方法通过简单算例及西部某实际超高压线路加以验证。

1 功率测量误差产生原因

1.1 仅含串补装置线路的功率计算误差分析

超高压线路由于输送距离较长,为了提升线路的传输能力,通常会在变电站加装串联补偿装置。对于仅含串补装置的线路,其线路末端等效电路如图1。

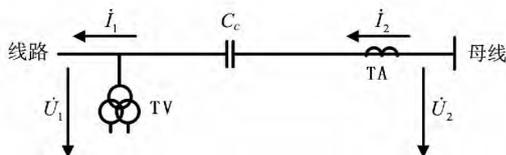


图1 仅含串补装置线路末端等效电路图

由图1可知,该线路功率测量需要利用线路末端 TV、TA 测量的线路的电压与电流。然而,由于实际 TV、TA 装设的位置,仅能获知串联补偿装置首端相电压 \dot{U}_1 以及串联补偿装置后的电流 \dot{I}_2 。测量装置得到的有功功率和无功功率为

$$P_{2cl} = \text{Re}(3\dot{U}_1\dot{I}_2) \quad (1)$$

$$Q_{2cl} = \text{Im}(3\dot{U}_1\dot{I}_2)$$

而实际线路的有功功率和无功功率计算应该为

$$P_2 = \text{Re}(3\dot{U}_2\dot{I}_2) \quad (2)$$

$$Q_2 = \text{Im}(3\dot{U}_2\dot{I}_2)$$

由图1可知电流电压关系满足:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{I}_2 = \dot{I} \\ \dot{U}_1 - \dot{U}_2 &= \frac{-\dot{I}}{j\omega C_c} \end{aligned} \quad (3)$$

根据电流电压关系可得到视在功率计算公式,将实虚部分别展开即可得到有功功率和无功功率为

$$\begin{aligned} P_2 &= P_{2cl} \\ Q_2 &= Q_{2cl} - 3 \frac{|\dot{I}_2|^2}{\omega C_c} \end{aligned} \quad (4)$$

由式(4)不难看出,当线路中仅接入串补装置时,测量装置获得的有功功率数据是准确的;误差体现在无功功率上。无功功率的误差是由串补电容发出的无功引起的,且负荷越重误差越大;另一方面,误差也与串补装置的等效电容值 C_c 有关,电容越大,误差越小。

1.2 串补装置与高压电抗器同时引入后线路的功率计算误差分析

此外,为了抑制由长距离线路充电无功导致的工频过电压问题,变电站内可能还装设了高压电抗器。此时线路末端等效电路如图2所示。

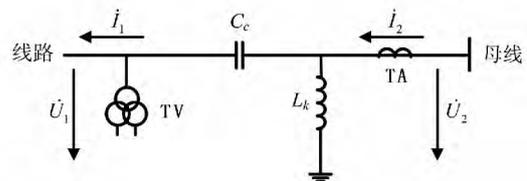


图2 串补装置与高压电抗器同时引入后线路末端等效电路图

与仅含串补装置线路的情况类似,此时测量装置仅能获知串联补偿装置首端相电压 \dot{U}_1 以及串联补偿装置、高压电抗器后的电流 \dot{I}_2 。与上述分析相同,此时电流电压关系满足:

$$\dot{U}_2 - \dot{U}_1 = \frac{\dot{I}_2}{j\omega C_c} \quad (5)$$

$$\dot{I}_2 - \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_2}{j\omega L_k}$$

展开实虚部,可以求得不可测量的电气量 \dot{U}_2 为

$$U_{2\text{Re}} = \frac{\omega^2 L_k C_c U_{1\text{Re}} + \omega L_k I_{2\text{Im}}}{\omega^2 L_k C_c - 1} \quad (6)$$

$$U_{2\text{Im}} = \frac{\omega^2 L_k C_c U_{1\text{Im}} - \omega L_k I_{2\text{Re}}}{\omega^2 L_k C_c - 1}$$

又由复功率公式得

$$S_2 = P_2 + jQ_2 = 3\dot{U}_2\dot{I}_2 \quad (7)$$

由式(1)和式(2)可以得到线路末端的有功功

率 P_2 为

$$P_2 = \left(\frac{\omega^2 L_k C_c}{\omega^2 L_k C_c - 1} \right) P_{2cl} \quad (8)$$

同样,可以算得线路末端的无功功率 Q_2 为

$$Q_2 = \left(\frac{\omega^2 L_k C_c}{\omega^2 L_k C_c - 1} \right) \left(Q_{2cl} - 3 \frac{|\dot{I}_2|^2}{\omega C_c} \right) \quad (9)$$

由式(8)和式(9)可以得到如下结论:同时装设了串补装置和高压电抗器的线路末端功率测量,有功和无功都存在误差。真实有功功率和测量值之间存在一个固定的比例系数,该系数由装置参数即串联补偿装置电容 C_c 和高压电抗器电感 L_k 决定,且 $L_k \cdot C_c$ 值越大,这个比例系数越接近于1,有功功率测量误差越小。而真实无功功率与测量值之间的误差较大,无功功率也存在真实值与测量值的比例系数,该比例系数与有功功率的比例系数完全相同;无功功率的误差,与上面分析的仅含串补装置的情况相同,主要是由于串补电容发出的无功功率并未计入测量而引起的,同样的,误差与负荷大小以及串补装置的等效电容大小有关,负荷越重,无功误差越大;串补装置的等效电容值 C_c 越大,误差越小。

2 功率修正算法

2.1 仅含串补装置线路的功率修正算法

为解决上述问题,提出一种基于原测量装置的测量数据,经修正得到线路真实功率的计算方法。根据上述分析可以得到相应的修正算法。

根据1.1节中的分析,仅含串补装置的线路有功功率测量准确,无需修正,而无功功率可以根据式(5)的结果获得:

$$Q_2 = Q_{2cl} - 3 \frac{|\dot{I}_2|^2}{\omega C_c} \quad (10)$$

修正公式需要用到测量的无功功率 Q_{2cl} 、电流幅值 I_2 和串联补偿装置的电容 C_c 。理论上式(10)求得的无功功率是没有误差的,但由于测量和参数的误差是必然存在的,计算值仍会存在微小的误差。

2.2 串补装置与高压电抗器同时引入后线路的功率修正算法

串补装置和高压电抗器同时引入后,线路功率算法相对复杂一点,根据1.2节中的分析,整理式(8)和式(9)可得母线流出功率为

$$P_2 = k \cdot P_{2cl} \quad (11)$$

$$Q_2 = k \cdot (Q_{2cl} - Q_{bc})$$

式中: k 为修正系数 $k = \left(\frac{\omega^2 L_k C_c}{\omega^2 L_k C_c - 1} \right)$; Q_{bc} 为计算补偿无功 $Q_{bc} = 3 \frac{|\dot{I}_2|^2}{\omega C_c}$ 。

修正算法中需要用到有功功率测量值 P_{2cl} 、无功功率测量值 Q_{2cl} 、电流幅值 I_2 、串联补偿装置电容 C_c 和高压电抗器电感 L_k ,由式(11)可以准确计算线路功率。

由上述计算可以看出,有功功率测量误差主要受串联补偿装置的容抗和高压电抗器的感抗影响,功率测量的百分误差是固定值,与负荷的大小无关;而无功功率测量误差主要是由串联补偿装置产生的无功造成的,其数值不仅受串联补偿装置的容抗和高压电抗器的感抗影响,还与线路末端的电流有关,即与负荷大小有关,负荷越大误差越大。

需要注意的是,串联补偿设备并非一直投入运行,该设备消缺时线路也可运行,为保证修正结果的正确性,应对串联补偿设备投入运行情况进行判别后,再进行功率修正。串联补偿投入判别条件:旁路开关 = “0” & 旁路刀闸 = “0” & 线路有压 = “1”。此时功率修正计算为

$$P_2 = P_{2cl}$$

$$Q_2 = Q_{2cl} + 3 \frac{|\dot{U}_2|^2}{\omega L_k} \quad (12)$$

3 算例验证

由于所提两种情况的修正算法理论上方法是一样的,仅是公式表达式不同,且仅含串补装置的情况较串补装置和高压电抗器同时接入的情况简单,故本节中仅验证后者。

3.1 小型算例验证

利用如图3所示的算例,验证算法的有效性。

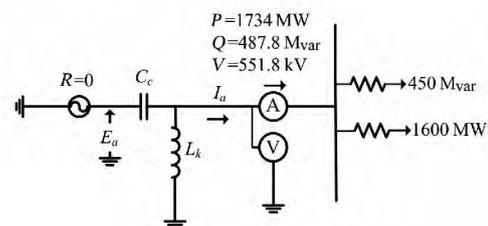


图3 PSCAD 仿真电路图

如图3所示,算例中串补及高压电抗器采用了与某500 kV变电站一致的参数。串补设备和高压电抗器的参数分别为: $\omega C_c = 0.046 \text{ S}$; $\omega L_k = 1669 \Omega$ 。电路首端施加530 kV的理想电压源,末端布置了恒阻抗负荷,负荷大小如图3所示。

根据PSCAD电磁暂态仿真结果,电路末端的有功达到1734 MW,而无功达到-487.8 Mvar。同时根据测量结果,串补首端相电压的幅值 U_1 为305.996 kV,串补、高压电抗器后的电流幅值 I_2 为1.885 kA, U_1 超前 I_2 的相角 δ 为 8.369° 。

利用传统不当算法进行有功计算,也可以得到

$$P_2 = -3U_1I_2\cos\delta = 1711.98 \text{ MW} \quad (13)$$

误差约为1.3%。

而利用式(11)所列的算式可得

$$P_2 = -1734 \text{ Mvar} \quad (14)$$

与真实值一致。

同样,根据传统不当的计算方法,有

$$Q_2 = -3U_1I_2\sin\delta = -251.86 \text{ Mvar} \quad (15)$$

与真实值-487.8 Mvar差距极大,误差达到48%。

而利用式(11)所列的方程,可得

$$Q_2 = -489.92 \text{ Mvar} \quad (16)$$

与真实值-487.8 Mvar仅0.43%的误差。

PSCAD仿真算例可得结论:所提算法可以准确计算出线路末端实际有功功率和无功功率。

表1 2016年3月16日11:27:09 SCADA显示的各出线的有功、无功、电流结果与修正后的结果

项 目	SCADA 显示数据			修正后数据	
	I/A	P/MW	Q/Mvar	P/MW	Q/Mvar
线路一	624.8	-567.8	130.9	-575.294	106.8169
线路二	506.8	-450.6	82.2	-456.547	66.30331
线路三	572.0	-513	108.1	-519.77	87.89426
线路四	514.2	-490.2	15.2	-490.2	15.2
线路五	522.0	-493.2	16.7	-493.2	16.7
线路六	818.1	749	-118.7	749	-118.7
线路七	814.5	747.4	-118	747.4	-118
线路八	859.1	784	-110.4	784	-110.4
线路九	659.9	612.7	-98.9	612.7	-98.9
2号主变压器高侧	184.6	-156	70.8	-156	70.8
1号主变压器高侧	238.8	-202.4	79.2	-202.4	79.2
不平衡量	-	19.9	57.1	-0.311	-3.08553

3.2 某500 kV变电站功率平衡结果

仿真软件中得到了算法可靠的结论,那么再将所提算法在实际运行情况进行验证。

某500 kV变电站串联补偿设备和高压电抗器的参数分别为: $\omega C_c = 0.046 \text{ S}$, $\omega L_k = 1669 \Omega$ 。图4所示是某500 kV变电站500 kV侧的接线图。表1给出了2016年3月16日11:27:09 SCADA显示的该变电站500 kV各出线的有功功率、无功功率和电流幅值以及采用所提算法修正后的有功功率、无功功率。

由表1可知,SCADA测量的结果显示此时该变电站500 kV的有功不平衡达到了19.9 MW,无功不平衡达到了57.1 Mvar。而利用修正算法公式对线路一、线路二、线路三进行修正后,该变电站的有功不平衡降低至0.3 MW左右,而无功不平衡情况也降低至3.08 Mvar。此结果证明了所提算法的正确性。

4 结 论

对变电站中出现母线功率不平衡这一现象的原因进行了分析,这一现象通常发生在带有同时装设了串补装置和高压电抗器的超特高压线路的变电站中。由于串补线路的测量TV安装位置远离测量TA,功率计算时忽略了串联补偿装置和高压电抗器产生的无功功率,无功功率误差很大。基于基尔霍

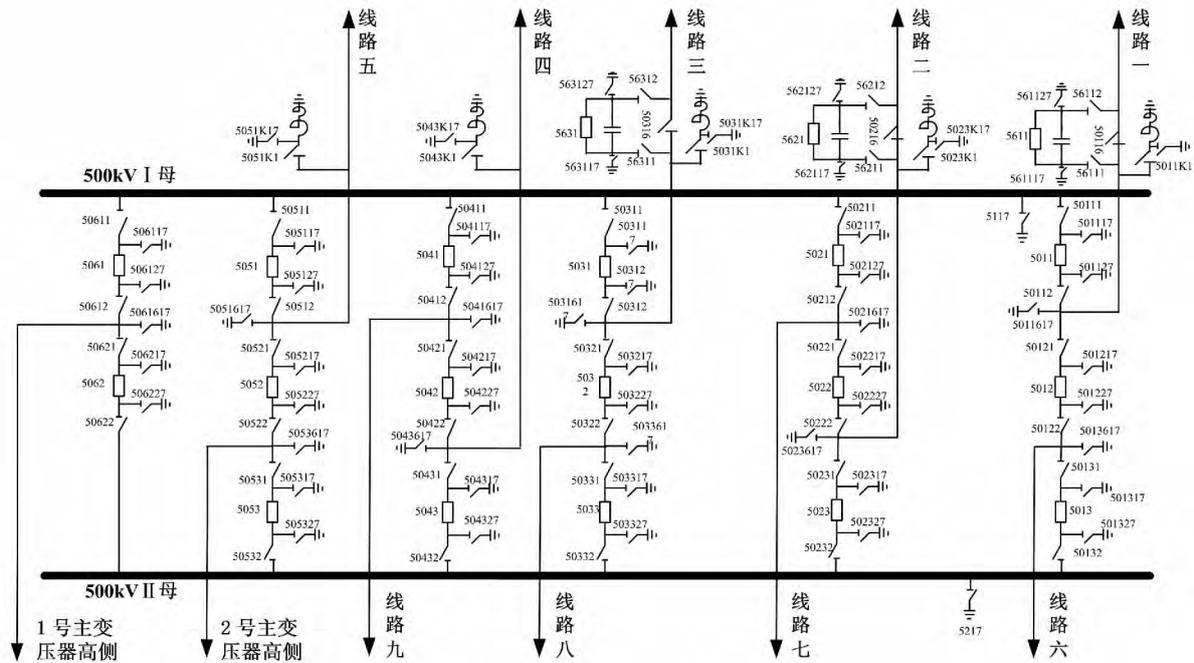


图4 某变电站500 kV侧的接线图

夫定律提出了利用现有测量值对功率测量进行修正的计算方法。理论上应用所提算法计算母线功率是没有误差的,应用算法后仍然存在的微小的母线功率不平衡量,这来源于参数误差和测量误差。将修正算法在PSCAD中进行了算例仿真验证,并用某500 kV变电站的实时数据进行了验证,在实际应用中证明应用修正算法后母线不平衡量大大减小,达到可接受误差范围内。

参考文献

[1] 雷宪章, D. Povh. 串联补偿技术在远距离高电压交流输电系统中的应用[J]. 电网技术, 1998, 22(11): 36-40.
 [2] 曹路, 陈珩. 可控串联补偿抑制次同步谐振的机理[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(4): 25-30.
 [3] 张彦魁, 张焰, 卢国良. 可控串联补偿电容器控制角模型及其在静态电压稳定研究中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 17-22.
 [4] 董飞, 魏文轩, 王庆红. 可控串联补偿器的特性分析研究综述[J]. 华中电力, 2011, 24(3): 43-45.

[5] 周俊宇. 静止同步串联补偿器在电力系统中的应用综述[J]. 电气应用, 2006, 25(4): 51-54.
 [6] 曾昭华, 李汉香. 500 kV 高压电抗器的功用和选择[J]. 中国电力, 1993, 26(1): 15-18.
 [7] 潘雄, 丁新良, 黄明良, 等. 可控高压电抗器应用于西北750 kV 电网的仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(22): 104-107.
 [8] 张建兴, 王轩, 雷晰, 等. 可控电抗器综述[J]. 电网技术, 2006, 30(S2): 269-272.
 [9] 周勤勇, 郭强, 冯玉昌, 等. 可控高压电抗器在西北电网的应用研究[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 48-52.
 [10] 周勤勇, 郭强, 卜广全, 等. 可控电抗器在我国超/特高压电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 1-6.
 [11] 郑涛, 赵彦杰. 超/特高压可控并联电抗器关键技术综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(7): 127-135.
 [12] 邢金, 宋磊, 侯贝贝, 等. 电力系统厂站端母线功率不平衡原因分析及解决方法研究[J]. 华北电力技术, 2015(9): 49-53.

(收稿日期: 2016-08-16)

国家电网公司面向社会各界征集新技术

国家电网公司贯彻落实国家创新驱动发展战略, 致力于推动电力新技术在电网建设、生产、运营中的推广应用工作。现诚邀社会各界通过新技术征集平台(国家电网公司电子商务平台 <http://ecp.sgcc.com.cn>)开展新技术申报工作。