

南方电网交直流混合系统线损的实用计算方法

刘军¹, 谢敏², 刘洪涛³, 刘明波²

(1. 广东电网公司广州供电局, 广东 广州 510620; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640;
3. 中国南方电网公司电力调度通信中心, 广东 广州 510623)

摘要: 降低线损是提高电网运行经济性的重要措施。以南方电网西电东送系统为研究背景, 根据 IEC 61803 标准, 并结合实际工作经验, 对西电东送交直流混合系统的线损计算进行研究, 剖析了送电量、电网结构、送电构成以及设备维护水平等几大影响西电东送系统线损的关键性因素, 对提高我国西电东送系统的运行经济性具有较好启发作用。

关键词: 西电东送; 线损计算; 交直流混合系统

Calculation for "line of AC/DC hybrid system" in China Southern Power Grid

LIU Jun¹, XIE Min², LIU Hong-tao³, LIU Ming-bo²

(1. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou 510620, China; 2. Electric Power College of South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. China Southern Power Grid Company, Guangzhou 510623, China)

Abstract: Decreasing line loss is an important measure to improve power system operation economy. Based on the system of transmission electricity power from the west to the east in China Southern Power Grid, and according to IEC 61803 and real work experience, this paper studies on the line loss of the complex AC and DC hybrid system. Some key factors are proposed and analysed, such as transmission quantity, network structure, transmission constitution and equipment maintenance condition. This paper may be of good enlightenment effect to the system of transmission electricity power from the west in our country.

Key words: transmission electricity power from the west to the east; calculation of line loss; AC and DC hybrid system

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)21-0065-04

0 引言

南方电网西电东送通道每年将大量的电力由贵州、云南和天生桥送往广西和广东, 对南方五省区电力资源的优化和合理配置, 以及各省区的经济发展起到重要作用。由于西电东送送电距离远, 送电功率大, 西电东送通道的线损很大, 近几年在西电东送通道增加不多的情况下, 其线损随送电量的增加而增大, 如, 2005年西部送广东电量为270亿千瓦时, 西电东送线损率达到4.62%, 2006年西部送广东电量为368亿千瓦时, 比2005年增加98亿千瓦时, 线损率达到5.45%。因此, 降低西电东送系统的线损成为提高南方电网运行经济性的重要举措。

南方电网西电东送是世界上最复杂的交直流混合系统, 具有高肇、天广、贵广等四回高压直流线路和其他交流输电通道, 其线损计算所需数据统计量极大, 影响因素复杂。目前, 关于交流

系统的线损计算已经较为成熟, 而直流系统研究主要依据 IEC 61803 标准建立的直流系统损耗计算模型^[1], 如, 文献[2,3]就基于 IEC 61803 对高压直流输电系统的损耗计算进行了研究, 并开发了相应计算软件。

本文基于交直流输电系统的运行特性, 综合考虑交流系统和直流系统的线损理论, 采用交直流系统潮流仿真计算线路的电能损耗, 并基于 IEC 61803 标准和实际工作经验快速估算高压直流系统中的换流站各部件及接地极的损耗, 探讨了较为实用化的交直流混合输电系统的线损计算方法。在此基础上, 文章进一步剖析了影响西电东送线损的几个关键性因素, 对提高我国西电东送系统的运行经济性具有较好的启发作用。

1 西电东送线损的实用化计算方法

南方电网所辖西电东送是世界上最复杂的交直流混合系统, 其线损计算也是一个非常复杂的

系统工程。实际工作中，西电东送的电能损耗主要由交流系统损耗和直流系统损耗两部分构成。

1.1 高压交流输电系统损耗计算

高压交流系统损耗计算已经非常成熟，并已开发有相应的计算软件^[4]。中华人民共和国电力行业标准 DL/T 686-1999 对交流线路、双绕组和三绕组变压器的电能损耗计算方法进行了详细阐述^[5]。总的来说，高压交流系统的电能损耗计算主要有潮流法（含修正）以及均方根电流法两种，这两种计算方法均已达到实用化程度，本文不再详述，具体参见文献[5, 6]。

1.2 高压直流输电系统损耗计算

直流线路、接地极系统和换流站是高压直流输电系统产生电能损耗的主要元件。因此，高压直流输电系统电能损耗 ΔL_{dc} 的计算可用式(1)表达：

$$\Delta L_{dc} = \Delta A_L + \Delta A_D + \Delta A_T \quad (1)$$

其中： ΔA_L 为直流线路的电能损耗； ΔA_D 为接地极系统的损耗； ΔA_T 为换流站的损耗。

实际工作中，我们采用以下方法来计算三者的电能损耗。

(1) 直流输电线路的损耗 ΔA_L

直流输电线路损耗取决于输电线路的长度及线路导线截面的大小，对于远距离输电线路其功率损耗通常约占额定输送容量的 5%~7%^[7]，是直流输电系统损耗的主要部分。以图 1 两端直流输电系统为例，我们采用交直流混合输电系统潮流算法计算直流线路的电能损耗。

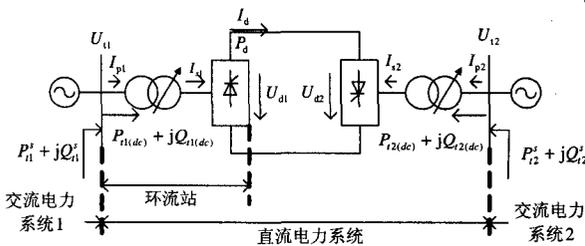


图 1 两端直流系统示意图

Fig.1 Schematic diagram for the double-end HVDC system

通过潮流计算，可以求出交流和直流输电系统在计算时段中每个小时的各种电气量，包括：换流站交流侧母线电压 U_{11} 、 U_{12} ；流进换流站的电流 I_{p1} 、 I_{p2} ；流入换流变的功率 $P_{11(dc)} + jQ_{11(dc)}$ 、 $P_{12(dc)} + jQ_{12(dc)}$ ；直流输电线路两端电压 U_{d1} 、 U_{d2} ；直流输送功率和电流 P_d 、 I_d 。

因此，直流线路的电能损耗 ΔA_L 为：

$$\Delta A_L = \sum_{t=1}^T I_{d(t)}^2 R \quad (\text{MWh}) \quad (2)$$

式中： $I_{d(t)}$ 为每小时流过直流线路的电流，kA； R 为直流线路的电阻， Ω ； T 为线路运行时间，h。

在实际计算中，还可考虑直流线路损耗的温度补偿及电晕损失的影响，并对式(2)进行相应修正。

(2) 接地极系统的损耗 ΔA_D

高压直流输电系统一般通过接地极系统形成回路，由于接地极系统中接地极线路电阻和接地电阻存在，故不可避免地产生一定损耗。接地电阻一般在 0.05~0.5 Ω 之间。为了计算方便，更易于在工程上实用化，一般不进一步计算接地电阻的大小，而是取其实测值或在 0.05~0.5 Ω 之间选用一合适值进行计算。虽然谐波电流对接地极系统损耗有一定的影响，但由于流经接地极系统的电流较小，谐波损耗占接地极系统损耗比例更小，可以忽略谐波损耗，采用与直流输电线路损耗相同的计算方法来计算接地极系统损耗，其计算公式为：

$$\Delta A_D = \sum_{t=1}^T I_{g(t)}^2 (R_d + R_D) \quad (\text{MWh}) \quad (3)$$

式中： $I_{g(t)}$ 为每小时流过接地极系统的电流，kA； R_d 为接地极线路的电阻， Ω ； R_D 为接地电阻， Ω ； T 为接地极线路运行时间，h。

R_d 同样要考虑导线温升和环境温度的影响。当高压直流输电系统工作在双极方式时， $I_{g(t)}$ 等于流过直流线路的电流 $I_{d(t)}$ 的 1%~3%；当其工作在单极大地回线方式， $I_{g(t)}$ 等于流过直流线路的电流 $I_{d(t)}$ 。因此，接地极系统损耗与高压直流输电系统的运行方式有关，双极运行时其值很小，单极大地回线方式运行时其值较大。

(3) 换流站的损耗 ΔA_T

直流输电系统两端换流站的设备类型繁多，它们的损耗机制又各不相同，因此准确计算换流站损耗比较复杂，通常换流站的功率损耗约为换流站额定功率的 0.5%~1%^[7]。

由于换流站产生谐波，因而换流站的电能损耗计算要考虑谐波的影响，致使整流站和逆变站的损耗计算比较复杂。实际工作中，可采用两种方法计算，即，根据经验值估算，和根据 IEC 61803 标准对整流站和逆变站的损耗实施精确计算。

I) 经验值估算的方法：根据厂家提供的资料统计，换流站的功率损耗约为换流站额定功率的 0.5%~1%^[7]，或根据运行经验调整这个功率损耗

值。因此,换流站的电能损耗等于这个功率损耗估算值与运行时间之积。

II) 精确计算方法: IEC 61803 标准已对高压直流输电系统换流站中各元件,如换流变压器、晶闸管阀、交流滤波器、并联电容器、并联电抗器、平波电抗器等的功率损耗计算建立了详细的数学模型。其中,换流站损耗主要是来源于换流变压器和换流阀的损耗,两者几乎占到换流站损耗的80%左右。直流换流站各元件损耗的分布情况如表1所示。

表1 典型直流换流站元件功率损耗的分布情况

Tab.1 The typical loss distribution HVDC component

元 件		所占比例/(%)
换流变压器	空载损耗	12-14
	负载损耗	27-39
换流阀		32-35
平波电抗器		4-6
交流滤波器		7-11
其它元件		4-9

由于换流站产生高次谐波,因此,必须考虑谐波电流对换流站各元件造成的损耗。在实际计算中,我们假定计算时段内每小时流过各元件的电流不变,采用正点电流值来计算谐波电流及谐波损耗,计算时段内各小时损耗累加即为元件在计算时段内的电能损耗。

1.3 电能损耗统计

1.1 和 1.2 小节给出了西电东送系统各元部件的电能损耗实用化计算方法,据此,可对西电东送系统的总电能损耗情况予以统计。在实际工作中,我们主要采取以下四个步骤:

(1) 根据西电东送的年度电力电量计划,确定每个季度典型日的高峰、低谷、腰荷三个时段对应的典型潮流,根据每个时段的典型潮流计算出该时段的线损。

(2) 根据每个时段的线损率和西电东送的年度电力电量计划,计算出每个时段的损耗电量。

(3) 将一年中所有时段的损耗电量累加,得出一年的总损耗电量。

(4) 将一年的总损耗电量除以云南、贵州和天生桥一年的总送出电量即为西电东送系统的线损率,如下式所示。

$$\text{西电东送线损率} = \frac{\text{云贵天总送出电量} - \text{广东和广西总受入电量}}{\text{云贵天总送出电量}}$$

2 应用实例

本文以南方电网2006年西电东送数据为例,利用BPA电力系统分析软件,采用上述实用化方

法,对西电东送线损情况进行了统计和计算。以峰、腰、谷荷为典型运行方式,2006年四个季度的损耗电量和线损率统计如表2所示。

表2 南方电网2006年西电东送线损统计情况表

Tab.2 Statistical result of line loss from the west to the east of China Southern Power Grid

	第一季度		第二季度	
	损耗电量	线损率	损耗电量	线损率
高峰	1.289	4.382%	3.561	5.450%
腰荷	0.622	3.837%	0.843	4.584%
低谷	0.224	3.237%	0.915	4.370%
合计	2.135	4.063%	5.319	5.082%
	第三季度		第四季度	
	损耗电量	线损率	损耗电量	线损率
高峰	6.652	6.273%	4.944	6.039%
腰荷	0.860	5.652%	1.223	5.331%
低谷	1.818	4.899%	1.317	4.874%
合计	9.330	5.891%	7.484	5.677%

注:“损耗电量”单位为亿kWh。

将表2中四个季度的损耗电量累加可得2006年的总网损电量为24.27亿kWh;根据2006年云南、贵州和天生桥总送出电量,可计算得出2006年直调系统的理论线损率为5.42%。考虑到设备计划检修和故障停运等因素对线损率的不利影响,因此,2006年西电东送的线损率约为5.6%。

3 西电东送线损影响因素剖析

3.1 电网结构和送电量是影响西电东送线损的决定性因素

由于输电线路、变压器等设备都含有电阻 R ,因此当电流在流过输电线路、变压器等设备时会产生损耗 $P_{\text{损耗}}$,损耗 $P_{\text{损耗}}$ 与输送功率 P 之比为线损率 η 。损耗及线损率与输送功率和电阻的关系如式(4)、(5)所示。

$$P_{\text{损耗}} = I^2 R = \left(\frac{P}{U}\right)^2 R = \frac{P^2 R}{U^2} \quad (4)$$

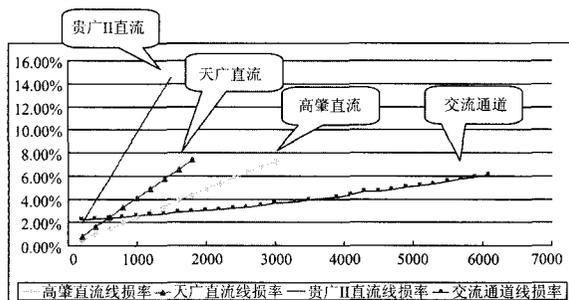
$$\eta = \frac{P_{\text{损耗}}}{P} = \frac{I^2 R}{P} = \frac{\left(\frac{P}{U}\right)^2 R}{P} = \frac{PR}{U^2} \quad (5)$$

在简化的情况下,上述公式对交、直流输电系统均适用。从公式看出,在其它参数一定的情况下,线损率与输送功率和线路电阻成正比,与输电电压的平方成反比。

对于西电东送输电线路而言,直流控制系统可使直流输电线路送端的电压基本保持不变(例如,±500kV),而交流线路沿线各站点无功补偿装置的投退可使交流系统主要中枢点的电压基本控制在合理范围内而变化不大,故,西电东送通道各站点

电压 U 可视为不变, 因此有, 交、直流输电线路的损耗与输送功率的平方 P^2 和线路电阻 R (反映电网结构, 与并联线路条数、线路长度、导线材料及界面等相关) 成正比, 线损率与输送功率 P 和线路电阻 R 成正比, 线路输送功率 P 越大或输电线路越长 (即 R 越大) 则线损和线损率均越大。

通过计算, 高肇直流、天广直流、兴安直流和西电东送交流通道的线损率与输送功率的关系可用图 2 (横坐标单位为万 kW) 来表示。由图 2 可知, 西电东送交流通道和直流通道的线损率基本与通道的输送功率成正比, 当直流输电线路输送功率超过一定值后其线损率将大于输送相同功率的交流通道的线损率。



(注: 图中横坐标为输送功率, 纵坐标为线损率)

图 2 高肇、天广直流、兴安直流和西电东送交流通道线损率比较

Fig. 2 Line-loss rate comparison among Gaozhao, Tianguang, Xingan II DC lines and other AC lines

3.2 西电东送线损与送电构成密切相关

由于西电东送线损率是西部 (云贵天龙等) 送两广的综合线损率, 而不同交易电量传输的路径及长度不同, 通道的线损率也不同。近年西电送广东电量占西电总送两广电量比例不断提高 (2004 年 71.7%, 2005 年 79.2%, 2006 年 84.8%, 2007 年预计提高到 88.3%), 送广西的比例相应减少, 同时天生桥送电占总电量比例不断减少, 这都是导致近年西电东送线损率不断变化的重要因素。

3.3 设备维护水平对西电东送线损也产生较大影响

在电网结构、送电量及构成一定的情况下, 设备维护水平对西电东送线损率也产生较大影响。分析表明, 直流系统若因设备等原因出现降压运行、单极金属回线运行方式, 则相应线损率会大幅增加, 如, 高肇直流输送 1500 MW 功率时, 双极全压运行线损率约为 4.0%; 而单极全压金属回线运行, 线损率约为 12%; 双极降压 80% 运行, 线损率约为 11.4%。若西电东送交流线路非计划停运, 西电东送线损率也会加大。因此, 应加强设备运行维护, 尽量避免直流单极金属回线运行或降压运行, 尽量

避免线路等主要设备非计划检修。

4 结论

本文以南方电网西电东送通道为研究背景, 结合实际工作经验, 对西电东送交、直流混合系统的线损计算实用化方法进行了研究, 分析得出送电量、电网结构、送电构成以及设备维护水平是影响南方电网西电东送线损的几个主要因素, 对我国西电东送系统的线损计算具有较好的启发意义和工程实用价值。

参考文献

- [1] International Electrotechnical Commission. IEC 61803: Determination of Power Losses in High-Voltage Direct-Current (HVDC) Converter Stations[S]. 1999.
- [2] 李战鹰, 任震, 陈永进. 直流输电系统网损研究 (英文) [J]. 电力自动化设备, 2007, 27(1): 9-12.
LI Zhan-ying, REN Zhen, CHEN Yong-jin. Loss Study of HVDC System[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(1): 9-12.
- [3] 史丹, 任震, 余涛. 高压直流换流站损耗计算软件的开发和应用[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 81-83.
SHI Dan, REN Zhen, YU Tao. Development and Application of Loss Calculation Software for HVDC Converter Station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 81-83.
- [4] 林辉, 刘明波, 程启成, 等. 电网理论线损计算软件设计与开发[J]. 广东输电与变电技术, 2003, (4): 26-31.
LIN Hui, LIU Ming-bo, CHENG Qi-cheng, et al. Design and Development of the Software for Calculating Network Theoretical Line Loss[J]. Guangdong Power Transmission Technology, 2003,(4): 26-31.
- [5] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 中华人民共和国电力行业标准 DL/T 686-1999: 电力网电能损耗计算导则[S]. 2000.
The National Economy and Trade Committee. The Electric Power Industry Standard DL/T 686-1999: Calculation Guide for Line Loss of Power Network[S]. 2000.
- [6] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
XU Zheng. Dynamics Analysis for AC and DC Hybrid System[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [7] 赵晰君. 高压直流输电工程技术[M].北京: 中国电力出版社, 2004.
ZHAO Wan-jun. HVDC Engineering Technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

收稿日期: 2008-01-22; 修回日期: 2008-02-26

作者简介:

刘军 (1971-), 男, 工学硕士, 工程师, 研究方向为电力系统计算与控制; E-mail: liujun0923@163.com

谢敏 (1978-), 女, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统分析计算和优化;

刘洪涛 (1974-), 男, 博士, 研究方向为电力系统稳定性分析、运行控制、高压直流输电。