

# 云南电网外送交直流潮流最优分配研究

曾雪松<sup>1</sup> 张瀚月<sup>1</sup> 廖晨淞<sup>2</sup> 贺钰涵<sup>1</sup> 崔艳龙<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学电气工程学院 四川 成都 610031; 2. 成都电业局 四川 成都 610021)

**摘要:**云南电网是中国西电东送能源战略的重要组成部分,“十二五”期间拟将建成五回直流,形成一个大型的交直流混合输电系统,不同的交直流输电通道的功率分配,将产生不同的输电损耗。为使潮流分布更为合理,实现减少输电损耗、实现节能降耗的目的,建立了交直流输电最优损耗模型,并采用粒子群优化算法(PSO)计算交直流通道潮流的最优功率分配。优化后南方电网网损下降约 1%~6%,效果明显。

**关键词:**云南电网; 输电损耗; 功率分配; 粒子群优化算法

**Abstract:** As an important part of West-to-East power transmission project, Yunnan Power Grid will become a large-scale hybrid AC/DC power transmission system at the end of "The Twelfth Five-Year Guideline". The different power distributions of AC and DC line will form the different transmission losses. A model to determine the power distribution for each HVDC lines and AC lines of Yunnan Power Grid is proposed, the power distribution is optimized with particle swarm optimization (PSO) algorithm to get a minimum total power loss. The power loss of China Southern Grid is decreased by approximately 1%~6%.

**Key words:** Yunnan Power Grid; transmission loss; power distribution; particle swarm optimization (PSO)

中图分类号:TM744 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2012)03-0001-03

TU09ZT13)

## 0 引言

云南电网是中国西电东送能源战略的重要组成部分,至“十二五”末期拟将新建成四回直流,分别为中西部地区的云广直流、糯扎渡直流、金中直流和澜上直流,与东部地区的溪洛渡直流,形成一个大型的交直流混合输电系统,如图 1 所示。经过十多年的发展,云南电力外送规模从零起步提高到 2010 年的 7 800 MW,500 kV 主网架及外送通道的建设也逐步得到完善,2010 年云南电网已建成并形成围绕滇中和滇东的“品”字型 500 kV 环网,并辐射延伸至滇南、滇西、滇西南等区域,建成了“四交一直”的外送通道,外送能力达到 9 100 MW。

根据“十二五”规划,云南的电力外送事业还将得到较大的发展,外送规模还将由 7 800 MW 提高到 21 500 MW,在此基础上还可能新增 6 000 MW 季节性电能的送出。“十二五”期间,为配套糯扎渡、溪洛渡电站、金沙江中游电站的电力外送,将建设糯扎渡、溪洛渡电站送广东直流输电工程以及金沙江中

游电站送广西直流输电工程,为配套澜沧江上游电站的外送以及季节性电能的外送。到“十二五”末期,云南将建成“五交五直”的电力外送通道,外送能力达到 25 600~26 850 MW,裕度在 1 100~2 350 MW。如果是在外送规模较少的枯期,这一裕度将会更大。

这样,由于高压直流工程就不必为了提高整个系统的安全稳定水平而按额定容量运行。另外,由于交、直流输电的损耗特性不一致,在维持外送总规模不变的前提下,合理分配同一外送断面间的交、直流通道输送功率分配,将能起到节能降损的效益。因此,“十二五”期间云南主网架及外送通道的加强,为断面外送功率的优化提供了可能。

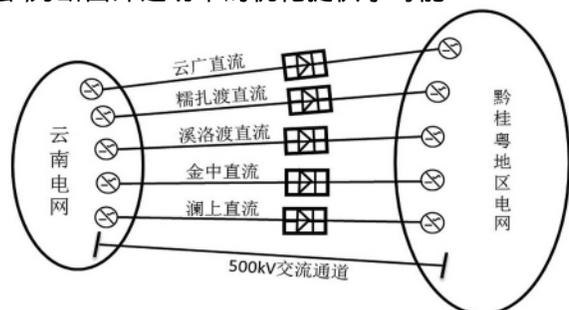


图 1 云南电网外送结构示意图

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金专题研究项目(SWJ-

如何在保持电网外送规模不变的前提下,利用直流输送功率的可控性,合理地分配交、直流输电通道的输送功率,以达到输电损耗最低的目标,是中国西电东送亟待解决的问题,是实现电网节能降耗的重要方式。

以云南电网为基础,研究了交流输电通道和直流输电通道的损耗特性,利用 Matlab 建立了交、直流混合输电系统的最小损耗模型,通过粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)在维持总外送不变的情况下,求解交直流各通道输送功率的最优分配解,并通过回写入 BPA 进行计算,比较优化效果。

## 1 交、直流输电通道的损耗特性

### 1.1 交流通道损耗特性

输电线路在输送电力的过程中会产生电力损耗,线路有功功率损耗计算如下。

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R + U_0^2 \cdot G_0$$
$$\approx \left(\frac{P}{U \cdot \cos\varphi}\right)^2 \cdot R = \frac{R}{U^2} \left(\frac{P}{\cos\varphi}\right)^2$$

其中,损耗系数  $k = \frac{R}{(U \cdot \cos\varphi)^2}$

式中  $P、Q、U$  为线路同一端的有功功率、无功功率、电压幅值;  $U_0$  为线路两端的平均电压幅值;  $R、X$  为线路串联电阻、电抗;  $G_0$  为线路并联电导;  $U_0^2 G_0$  为电晕损耗,数值很小,一般可忽略不计。

根据有功功率损耗计算公式,对输电线路损耗影响因素分析如下:①线路有功功率损耗与传输有功的平方及线路电阻值成正比;②线路有功功率损耗与传输功率因数的平方及系统运行电压的平方成反比。

因此,在交流通道建设方案已确定的前提下,要

想降低交流通道的输送潮流,只能通过合理安排线路潮流、合理投切电网无功补偿以减小线路无功功率传输、适当提高电网运行电压水平等措施来降低电网输电损耗。

### 1.2 直流系统损耗特性

直流线路损耗与线路长度成正比,包括与电压相关的损耗和与电流相关的损耗。

(1) 与电压相关的损耗:线路电晕损耗和线路绝缘子串泄漏损耗。由于后者数量很小,一般可以忽略不计(如天广直流占额定容量运行下线路电阻损耗的 3.9%)。直流线路电晕损耗比交流线路电晕损耗小,且受气候条件的影响也小。中国国家电力公司电力科学研究院曾对 500 kV 直流线路进行过实测,测得线路电晕损耗正极为 3.1 W/m,负极为 3.6 W/m。

(2) 与电流相关的损耗:直流电流在直流线路电阻上产生的损耗,与输送同样有功功率的交流线路相比,直流线路的损耗通常较小。直流线路损耗还与直流系统运行方式有关。按损耗大小从小到大排序为:双极线并联运行、大地回线运行、金属回线运行。

(3) 接地极引线及接地电极损耗:损耗可以忽略不计。

简化模型后,直流输电系统的损耗功率  $P_{loss}$  与输送功率  $P$ 、电流  $I$ 、电压  $U$ 、电阻  $R$  之间的关系推导如下。

$$P_{loss} = I^2 R = \left(\frac{P}{U}\right)^2 R = \frac{P^2 R}{U^2} = kP^2$$
$$\eta = \frac{P_{loss}}{P} = \frac{PR}{U^2} = kP$$

其中,损耗系数  $k = \frac{R}{U^2}$ ;  $\eta$  是输电损耗率。

由上述两式可看出,在其他条件不变的情况下,损耗功率  $P$  与输送功率的平方和线路电阻成正比,与输电电压的平方成反比,损耗率  $\eta$  与输送功率和电路电阻成正比,与输电电压的平方成反比。

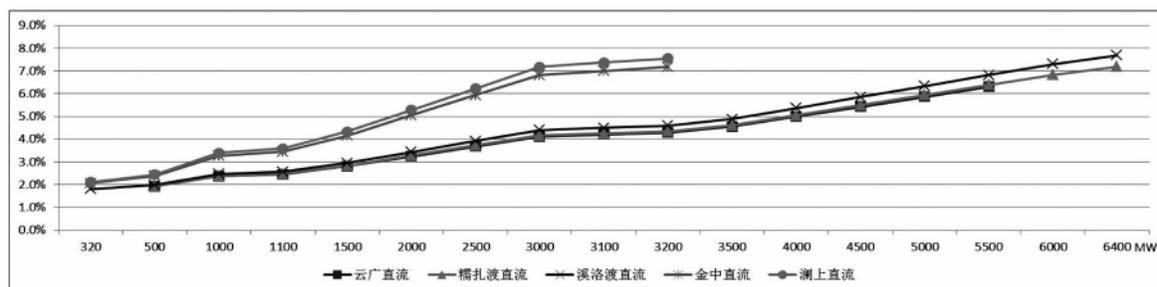


图2 云南电网各回直流输电损耗

根据直流系统运行参数,云南电网各回直流系统在运行过程中输电损耗随其输电功率的变化曲线如图 2 所示(考虑两端换流站有功损耗为输送功率 1.5%,各回直流运行方式为双极平衡运行)。

## 2 交、直流输电通道最小损耗模型

设云南电网外送通道的输电损耗为  $\Delta P$ ,云广直流输电损耗为  $\Delta P_1$ ,糯扎渡直流输电损耗为  $\Delta P_2$ ,溪洛渡直流输电损耗为  $\Delta P_3$ ,金中直流输电损耗为  $\Delta P_4$ ,澜上直流输电损耗为  $\Delta P_5$ ,交流通道输电损耗为  $\Delta P_6$ 。

总的云南外送损耗

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \quad (n=6)$$

优化目标为输电损耗最小,即

$$\min \Delta P = \min \sum_{i=1}^n \Delta P_i$$

约束条件为

$$\sum_{i=1}^n \Delta P_i = P_{\text{con}} \quad (n=6)$$
$$0 \leq \Delta P_i \leq P_{i\text{max}} \quad (i=1, 2, 3, 4, 5)$$

其中  $P_{\text{con}}$  为云南电网交、直流外送总电力;  $P_{1\text{max}}$  为云广直流输送功率极限;  $P_{2\text{max}}$  为糯扎渡直流输送功率极限;  $P_{3\text{max}}$  为溪洛渡直流输送功率极限;  $P_{4\text{max}}$  为金中直流输送功率极限;  $P_{5\text{max}}$  为澜上直流输送功率极限。

此模型属于带有等式约束的混合非线性规划问题,解决此类问题的常用算法包括外点法、内点法、可行方向法等。

粒子群优化 (PSO) 算法是 Kennedy 和 Eberhart 受人工生命研究结果的启发,通过模拟鸟群觅食过程中的迁徙和群聚行为而提出的一种基于群体智能的全局随机搜索算法,具有易理解、易实现、全局搜索能力强等特点,倍受科学与工程领域的广泛关注,成为发展最快的智能优化算法之一。这里采用粒子群优化 (PSO) 算法求解以上优化目标,使云南电网外送输电损耗值最小。

## 3 交、直流通道潮流最优分配计算

至 2013 年,云南电网将投产三回直流,分别为云广直流、糯扎渡直流和溪洛渡直流,其中云广直流为  $\pm 800$  kV,输电容量为 5 000 MW,双极运行;糯扎渡直流为  $\pm 500$  kV,输电容量为 5 000 MW,单极运行;溪洛渡直流为  $\pm 500$  kV,输电容量为 3 200 MW,单回双极运行。2013 年枯期大方式下,云南总体外送电力为 11 200 MW,各回直流均未满送,优化空间较大,具体优化结果见表 1。从表 1 中可看出,2013 年枯期大方式下,原始安排各回直流未送,交流断面约为 3 700 MW;优化后,云广直流和糯扎渡直流多送,溪洛渡直流少送,云电交流出口降至 3 000 MW 以下,整个南方电网网损有功损耗由 2 736.2 MW 降至 2 689.4 MW,减少约 1.71%,优化效果明显。

至 2015 年,云南电网将新增金中直流、澜上直流和溪洛渡直流的 II 回,其中金中直流和澜上直流均为  $\pm 500$  kV,输电容量为 3 200 MW,双极运行。2015 年丰期小方式下,云南总体外送电力为 15 900 MW,除澜上直流外其余各回直流均未满送,优化空间较大,具体优化结果见表 2。从表 2 中可看出,2015 年丰期小方式下,原始安排各回直流未送,交流断面约为 1 150 MW;优化后,云广直流和糯扎渡直流多送,溪洛渡直流少送,金中直流由于位于云南滇西北地区,送出损耗大,输送容量减少,整体云电交流出口降至 2 400 MW 以下,整个南方电网网损有功损耗由 2 325.8 MW 降至 2 183.7 MW,减少约 6.11%,优化效果较明显。

## 4 结 语

随着西电东送规模的不断增加,云南电网将成为国家西电东送的主要组成部分。根据拟签订的

表 1 2013 年云南电网输送功率优化前后对比

项 目	云广直流/MW	糯扎渡直流/MW	溪洛渡直流/MW	交流通道/MW	南网损耗/MW
优化前	3 500	1 750	2 240	3 711	2 736.2
优化后	4 284	2 104	1 934	2 882	2 689.4

(下转第 7 页)

的频率集中在 0 ~ 30 kHz 之间 ,故雷电流频率属于低频范围之内。

(3) 对于上升时间越快的雷电流而言 ,其频率分量的初始振幅值越小 ,但是其所含的高频分量却越丰富 ,谐波较多。

(4) 雷电流的能量分布主要集中在 1 ~ 10 kHz ,占总能量的 60.44%。工频附近(0 ~ 100 Hz)的能量只占到总能量的 2.66%。

通过以上的计算分析 ,明确了雷电流的参数确定、频谱特性及能量分布 ,为研究雷电对风力发电机产生的电磁干扰过程中 ,需要重点关注的雷电流频率范围打下坚实基础。

### 参考文献

[1] 王丽广. 风电机组的防雷保护 [J]. 交流技术与电力牵

(上接第 3 页)

表 2 2015 年云南电网输送功率优化前后对比

项 目	云广直流/MW	糯扎渡直流/MW	溪洛渡直流/MW	金中直流/MW	澜上直流/MW	交流通道/MW	南网损耗/MW
优化前	3 000	3 000	3 840	1 920	3 000	1 150	2 325.8
优化后	3 525	3 463	3 183	1 736	1 626	2 369	2 183.7

“十二五”西电东送框架协议的主要内容 ,至 2015 年 ,云南电网外送电力规模约占整个南方电网西电东送总规模的 50% ,云南电网拟将建成以五回直流、五回交流形成的外送网架。根据交、直流输电损耗的理论 ,在保持外送功率不变的前提下 ,不同的各回交、直流通道的输送功率将产生不同的输电损耗;由西电东送协议中安排的各年份各方式电力流来看 ,云南电网外送电力有一定的裕度 ,为各通道的输电容量调整提供了可能性。因此 ,如何安排各回交、直流输电线路的输送功率 ,使得输电有功损耗最小将是电网节能降耗的有效措施。前面建立了云南电网交直流主通道的最优功率分配模型 ,运用粒子群优化算法(PSO)求解 ,获得各输电通道的最优功率分配 ,从而使电网输电有功损耗降到最小。

计算结果表明 ,基于所建立的粒子群优化算法 ,可以优化云南电网交直流输送容量的分配 ,从而有效降低云南电网外送输电损耗 ,对电网的节能降耗有明显作用。

### 参考文献

[1] Kunder P. Power System Stability and Control [M]. 北京: 中国电力出版社 2002: 351 - 354.

引 2008(2):37 - 39.

[2] 康春华, 张小青, 王芳. 风电机组的防雷问题 [J]. 山西电力 2006(6): 62 - 64.

[3] C. E. R. Bruce and R. H. Golde. The Lightning Discharge [J]. Inst. Elec. Eng - Pt. 2, 1941, 88: 487 - 520.

[4] F. Heilder. Traveling Current Source Model for LEMP Calculation [M]. In Proc. 6th Int. Zurich Symp. Electromagn. Compat, Zurich, Switzerland, Mar. 1985: 157 - 162.

[5] 张飞舟, 陈亚洲, 魏明, 等. 雷电电流的脉冲函数表示 [J]. 电波科学学报 2002(17): 51 - 53.

[6] 张小青. 风电机组防雷与接地 [M]. 北京: 中国电力出版社 2008: 21 - 22.

作者简介:

程 锐(1985) ,男, 硕士研究生, 研究方向为风机控制与电力系统继电保护。

(收稿日期:2012 - 04 - 18)

[2] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[3] 陈维荣, 张倩, 王劲草, 等. 搜寻者优化算法在最优潮流中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(1): 64 - 67.

[4] 梁军. 粒子群算法在最优化问题中的研究 [D]. 广西师范大学 2008.

[5] 陈佳琰, 彭春华. 基于 PSAT 软件的多目标最优潮流计算 [J]. 华东交通大学学报 2007 24(2): 87 - 91.

[6] 王志勇, 梁敬成, 熊小伏, 等. 西电东送输电通道损耗最小最优功率分配方法 [J]. 南方电网技术, 2009, 3(2): 38 - 41.

[7] 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.

[8] 中国南方电网电力调度通信中心. 中国南方电网 2011 年运行方式 [Z]. 广州: 中国南方电网电力调度通信中心 2011.

作者简介:

曾雪松(1984) ,男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定与控制;

张瀚月(1989) ,女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统及其自动化, 新能源;

廖晨淞(1984) ,男, 硕士, 助理工程师, 主要从事电力调度工作。

(收稿日期:2012 - 03 - 20)