

# 基于直流灵敏度法的川渝电网输电能力受限成因研究

张林<sup>1</sup>, 沈钟浩<sup>2</sup>, 冯丽<sup>1</sup>, 尚学伟<sup>3</sup>, 赵林<sup>3</sup>, 史成钢<sup>1</sup>, 翟勇<sup>3</sup>

(1. 国网重庆市电力公司调控中心系统运行处, 重庆 400015; 2. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024; 3. 北京科东电力控制系统有限责任公司, 北京 100192)

**摘要:** 随着重庆负荷的快速增长, 川渝电网输电通道输送能力需要提升, 川渝联络线出现的分布严重不平衡问题也亟待解决。在对川渝鄂电网的潮流分布特征分析的基础上, 采用直流灵敏度分析法, 得到川渝电网系统关于川渝联络线的灵敏度关系, 对出现的分布不平衡问题进行分析。针对与重庆电网连接的湖北电网, 利用网络简化等效的思想对其做外部节点处理。结合川渝电网的实际情况, 对包括重庆电源、负荷, 四川电源、负荷, 渝鄂联络线在内的关于川渝联络线的灵敏度值进行对比分析, 得到受限原因, 并且提出改善措施。

**关键词:** 互联电网; 输电能力; 联络线; 灵敏度分析法; 网络简化

## Study on causes of limited transmission capacity of Sichuan-Chongqing power grid based on DC-sensitivity

ZHANG Lin<sup>1</sup>, SHEN Zhonghao<sup>2</sup>, FENG Li<sup>1</sup>, SHANG Xuewei<sup>3</sup>, ZHAO Lin<sup>3</sup>, SHI Chenggang<sup>1</sup>, ZHAI Yong<sup>3</sup>

(1. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400015, China;

2. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology,

Dalian 116024, China; 3. Beijing Ke Dong Electric Power Control System Co., Ltd., Beijing 100192, China)

**Abstract:** With the rapid growth of the load in Chongqing, it is necessary to improve the transmission access's capacity of the grids in Sichuan and Chongqing, and is urgent to address the problem of extremely imbalanced distribution for Sichuan-Chongqing connection. This paper is based on distribution characteristics analysis of Sichuan Chongqing and Hubei grids' power flow, adopts DC-sensitivity analysis and achieves Sichuan-Chongqing power grid system on Sichuan-Chongqing line of contact sensitivity, and analyzes the imbalance issues. It handles the Hubei's grids jointed with the grids in Chongqing, as the external nodes by the simplified and equivalent network. According to the actual situation of Sichuan-Chongqing grids, the sensitivity of Chongqing-Sichuan connections is comparatively analyzed, including power and load of Chongqing and Sichuan as well as Chongqing-Hubei connections. Lastly, the causes for limitations are got and some improvements are put forward.

**Key words:** interconnected power grid; transmission capacity; tie line; sensitivity analysis; network simplification

中图分类号: TM76

文章编号: 1674-3415(2015)18-0067-07

## 0 引言

由于我国能源与经济发达耗能地区的分布不均, 电力能源必然面临着远距离输送的问题。重庆电网处于四川水电外送通道, 是形成西电东送通道的关键区域之一, 同时也是三华电网实现跨流域水

火互济和更大范围资源配置的重要途径。由于重庆电网负荷的同步快速增长和川渝电网运行方式耦合的紧密性, 重庆电网的川电东送通道在大负荷运行方式下出现了较为突出的分布不平衡问题, 严重限制了川电东送通道的输电能力。为了更好地满足《电力系统安全稳定导则》的相关规定, 深入研究川渝电网之间的输电通道联络线传输能力的受限原因, 对实现联络线的安全稳定运行与最优效益具有重要意义。

**基金项目:** 国网重庆市电力公司 2014 年科技项目 (2014 渝电科技 21#)

对互联电网的研究常见有线性规划法、非线性规划法<sup>[1-2]</sup>、演化规划法<sup>[3-4]</sup>、模拟退火法<sup>[5-6]</sup>、网络流法<sup>[7-8]</sup>、遗传算法<sup>[9-10]</sup>、禁忌搜索算法和优化粒子群算法<sup>[11-12]</sup>等。此外，国内外学者从网架结构、负荷分布、电源分布以及与外部电网联系等方面入手，广泛采用灵敏度分析法来分析联络线分布不平衡的问题。灵敏度分析法是根据系统中物理量之间的关系，得到各节点功率变化与联络线传输功率的相关性大小<sup>[13-14]</sup>。文献[15]基于灵敏度分析法与神经网络算法，提出了一种互联电力系统联络线功率调整的方法，搭建了用于分析联络线功率调整的模型。文献[16]基于直流灵敏度法，提出了在线计算互联电网可用传输能力的算法模型。

本文依托于川渝电网，利用直流灵敏度分析法和外部网络简化等效的思想，分别计算川渝电网各电源和负荷关于两条川渝联络线的灵敏度。通过对比分析，最终得到川电东送输电能力受限的原因。

### 1 川渝鄂断面潮流分布特征

重庆电网分为 6 个片区运行：“思源-陈家桥-板桥-圣泉”片区、隆盛片区、“石坪-巴南”片区、“长寿-张家坝”片区、万县九盘、九盘片区，各供电片区内部维持 500/220 电磁环网运行，片区间 220 kV 解环运行。其中六个片区内各自的发电出力所占重庆总发电出力的比例如图 1 所示，各自负荷所占重庆总负荷的比例如图 2 所示。

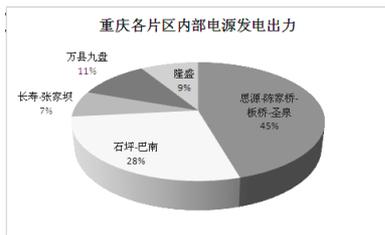


图 1 重庆各片区发电出力

Fig. 1 Generation capacity of each area in Chongqing

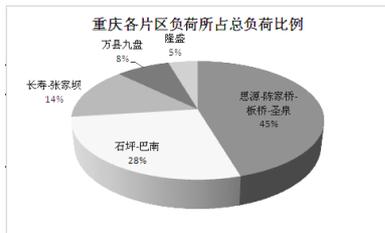


图 2 重庆各片区负荷分布

Fig. 2 Load distribution of each area in Chongqing

由于重庆内部电源不能满足重庆负荷的需求，因此需要从外部的四川和湖北购得电能。如图 3 所示，重庆电网通过 500 kV 洪板双回线、黄万双回线与四川电网联网运行(构成川渝断面)，通过 500 kV 盘龙双回线、张恩双回线与湖北电网联网运行(构成渝鄂断面)。

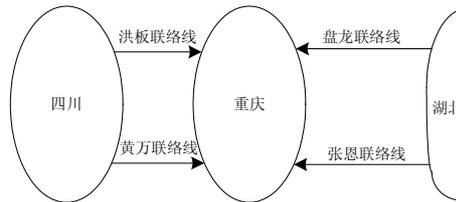


图 3 重庆与四川、湖北区域连接图

Fig. 3 Connection diagram of Chongqing and Sichuan, Hubei province

四川、湖北电网供给重庆的电能以及重庆内部电源的有功出力占重庆总负荷的比例如图 4 所示。

对于重庆电网的川电东送通道在大负荷运行方式下出现的较为突出的分布不平衡问题，本文选取 2013 年 7 月 15 日 13:00 的典型断面进行分析。该时刻，洪板线传输功率为 2 098 MW，而黄万线出现由重庆向四川倒送的情况，传输功率为 135 MW，出现了川渝断面两条联络线功率分布不平衡的最极端的情况。

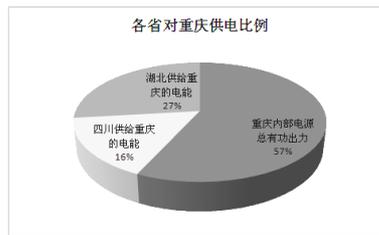


图 4 各省对重庆供电比例

Fig. 4 Power-supply percentage of Chongqing, Sichuan and Hubei province

洪板与黄万两条联络线传输功率的严重不平衡导致川电东送输电能力受到较大影响。受华中电网总体安全运行约束，电网存在着较为严重的拉闸限电风险，电网输电和供电能力的可靠性随之降低。而且相关输电瓶颈不仅制约了华中电网的整体资源优化配置能力，也对华中电网整体安全稳定运行产生较大的不利影响。

将 7 月 15 日 13:00 的重庆发电、负荷数据以及四

川发电、湖北发电数据输入到PSASP重庆夏大运行方式中, 得到了与该时刻川渝断面较为符合的潮流断面结果, 其川渝断面与渝鄂断面传输功率如表1所示。

表1 川渝断面与渝鄂断面传输功率

Table 1 Transmission power of Sichuan and Chongqing,

Hubei and Chongqing section

联络线	P/MW
洪板线	2 036
黄万线	-135
盘龙线	1 759
张恩线	1 484

## 2 求取直流灵敏度的基本原理和网络简化

### 2.1 求取直流灵敏度的基本原理

电力系统中灵敏度分析法是在求取节点导纳矩阵与支路导纳矩阵的基础上对电力系统进行规划决策以及运行控制。它通过分析某项运行指标与控制变量的关系来确定该变量对系统的影响, 从而进一步提出改善该运行指标的措施<sup>[17-18]</sup>。

运用灵敏度分析法可以直观地实现不同区域内部负荷和电源关于区域间的联络线的关联度的大小, 对后续的分析和对联络线传输功率的调整都具有很重要的意义。某一控制变量对联络线传输功率的灵敏度越大, 则该变量对联络线上的传输功率值的影响就越大。

在得到节点导纳矩阵的基础上, 根据网络的直流潮流方程和支路潮流方程, 可得到节点功率注入量与支路潮流间的灵敏度关系如式(1)和式(2)(设系统支路数为  $b$ , 节点数为  $n$ )。

$$\Delta \mathbf{L}_k = \mathbf{S} \cdot \Delta \mathbf{P} \quad (1)$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}^{-1} \quad (2)$$

式中:  $\Delta \mathbf{L}_k$  是支路有功潮流变化量构成的向量  $b \times 1$ ;  $\Delta \mathbf{P}$  是节点注入有功变化量构成的向量  $n \times 1$ ;  $\mathbf{B}_1$  是由支路导纳的虚部组成的对角矩阵  $b \times b$ ;  $\mathbf{B}$  是由节点导纳矩阵的虚部构成的方阵  $n \times n$ ;  $\mathbf{A}$  是网络的支路-节点关联矩阵。

矩阵  $\mathbf{S}$  是  $b \times n$  阶矩阵, 称为灵敏度矩阵, 描述了线路的有功潮流与节点注入功率间的关系; 其元素  $\mathbf{S}_{k,i}$  为线路  $k$  对于于节点  $i$  的灵敏度系数, 表示节点  $i$  上有功注入改变单位值时, 支路  $k$  的有功潮流的变化量为  $\mathbf{S}_{k,i}$ <sup>[19]</sup>。

针对川渝断面, 各个节点关于南北两条川渝联络线的灵敏度关系是本文关注的重点。设  $i$  节点关

于洪板联络线的灵敏度为  $\mathbf{S}_{1,i}$ , 关于黄万联络线的灵敏度为  $\mathbf{S}_{2,i}$ 。观察发现, 各节点关于两条联络线的灵敏度同为正或同为负, 即对于两条联络线的影响方向相同。利用式(3)可以得到任意节点  $i$  对于两条联络线影响的差异。

$$\Delta \mathbf{S}_i = |\mathbf{S}_{1,i}| - |\mathbf{S}_{2,i}| \quad (3)$$

$\Delta \mathbf{S}_i$  越小说明对于黄万联络线影响较大, 相反,  $\Delta \mathbf{S}_i$  越大说明对于洪板联络线影响较大。在此基础上, 分别对互联系统中不同区域内部的电源、负荷对潮流断面的影响进行分析。

### 2.2 外部网络简化等效

在实际的电网中目标区域内部的电网并不是孤立存在的, 而是与外部电网相连接形成一个整体。但是实际计算时, 为了突出川渝断面分析的核心问题并且简化运算, 本文把与重庆联接的湖北电网作为外部节点集合, 并进行简化等效处理, 其节点集合用  $E$  表示。重庆电网中, 与湖北电网相关联的节点组成边界节点集合, 用  $B$  表示。其余不和湖北电网直接相连的所有重庆、四川电网节点构成内部节点集合, 用  $I$  表示。网络划分结构关系如图5所示。

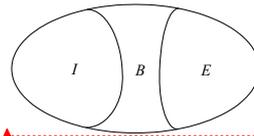


图5 网络划分结构关系图

Fig. 5 Diagram of network structure

将重庆、四川、湖北三省电网的节点导纳矩阵所表示的网络方程按照  $I$ 、 $B$ 、 $E$  集合划分, 可以写出用分块矩阵形式表示的网络方程如下:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{EE} & \mathbf{Y}_{EB} & \mathbf{0} \\ \mathbf{Y}_{BE} & \mathbf{Y}_{BB} & \mathbf{Y}_{BI} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Y}_{IB} & \mathbf{Y}_{II} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_E \\ \dot{\mathbf{V}}_B \\ \dot{\mathbf{V}}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_E \\ \dot{\mathbf{I}}_B \\ \dot{\mathbf{I}}_I \end{bmatrix} \quad (4)$$

消去外部节点的电压变量  $\dot{\mathbf{V}}_E$ , 有

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{Y}}_{BB} & \mathbf{Y}_{BI} \\ \mathbf{Y}_{IB} & \mathbf{Y}_{II} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_B \\ \dot{\mathbf{V}}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_B \\ \dot{\mathbf{I}}_I \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\tilde{\mathbf{Y}}_{BB} = \mathbf{Y}_{BB} - \mathbf{Y}_{BE} \mathbf{Y}_{EE}^{-1} \mathbf{Y}_{EB} \quad (6)$$

$$\dot{\mathbf{I}}_{BB} = \dot{\mathbf{I}}_B - \mathbf{Y}_{BE} \mathbf{Y}_{EE}^{-1} \dot{\mathbf{I}}_E \quad (7)$$

式中,  $\tilde{\mathbf{Y}}_{BB}$  是等值后的边界导纳矩阵, 它包括了外部网络简化后产生的等值支路的贡献<sup>[20]</sup>。

带格式的: 字体颜色: 黑色

### 3 川渝通道输电能力受限分析

#### 3.1 重庆负荷对川渝断面的影响

川渝电网共有有效母线1 949 条,支路4 553 条。

根据式(2)可得到重庆负荷节点对于川渝联络线的灵敏度。结果表明,同一片区中各负荷节点的灵敏度较为相似,而不同片区间负荷节点的灵敏度有明显差异。

如图 6 所示,按照各片区将各负荷求和,并统计各片区灵敏度的平均值和负荷比例。

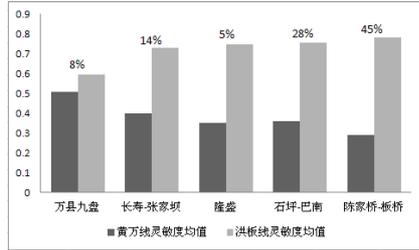


图 6 重庆各片区负荷灵敏度与负荷比例分布特点

Fig. 6 Distribution of load sensitivity and load proportion of each area in Chongqing

如图 6 所示:只有万县九盘片区,关于两条联络线的灵敏度相差不大;而另外四个片区,其对洪板线的灵敏度绝对值明显大于黄万线。说明这四个区域的负荷节点与洪板线的关系较为密切,而与黄万线关系较小。与重庆实际电网结构相吻合。

而分析重庆电网的负荷分布可以发现,万县九盘片区远离负荷中心,其负荷只占重庆负荷的 8%。而其余四个片区负荷占总负荷的 92%。尤其是处在负荷中心的“陈家桥-板桥”片区,关于两条联络线的灵敏度差异最明显,与洪板线的灵敏度联系也最大,其负荷占到了重庆总负荷的 45%。

由于这四个片区的负荷节点与洪板线的关系要密切的多,因此会导致川电东送的功率主要通过洪板线对重庆负荷供电,只有很少的功率会通过黄万线对重庆负荷供电,甚至出现 2013 年 7 月 15 日 13:00 黄万线倒送的情况。这也是造成川渝断面传输功率不平衡以及川渝断面输电能力受限的最主要原因。

#### 3.2 重庆电源对川渝断面的影响

重庆电源对于川渝联络线的灵敏度和各电源的有功出力与上限分别如图 7 和图 8 所示。

从图 7 得出万县九盘片区的电厂,如冉家坝、白鹤等电厂,对黄万线灵敏度绝对值相对其他电厂

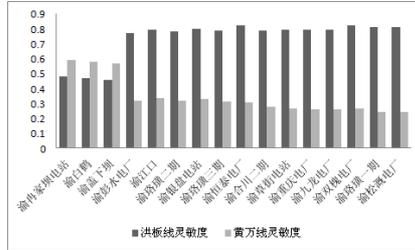


图 7 重庆各电厂关于联络线的灵敏度

Fig. 7 Each plant's sensitivity to connections in Chongqing

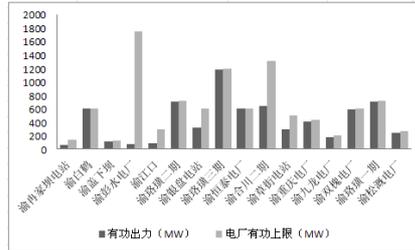


图 8 重庆电厂有功出力与上限

Fig. 8 Active generation and upper limit of plants in Chongqing

较大,对洪板线的灵敏度仅略小于黄万线灵敏度。因此,为增加黄万线输电量,可以适当减小这几个发电厂的有功出力来实现,但洪板线的输电量也会相应增加,这会进一步加剧洪板线的重载问题。另外从图 8 中可以看出,该地区电厂容量整体较小,对于黄万线输电量的提高能力有限。

对于“思源-陈家桥-板桥-圣泉”片区的电厂,如松溉、珞璜一期、双槐等电厂,对于洪板线灵敏度绝对值相对其他电厂较大,对于黄万线的灵敏度绝对值相对较小。对于这一类电厂,如果继续增加其有功出力,可以有效地减少洪板线有功传输量,缓解其重载问题,同时对于黄万线有功传输的削弱较小。但从图 5 中可以看出,这一地区电厂都处在满发或接近满发的状态,备用容量不足,并不具备大幅度改善洪板线重载的能力。

对结果进行进一步分析,可以发现,仍然具有较大出力裕度的彭水电厂和合川二期对于洪板线的灵敏度远大于黄万线的灵敏度,如果使其发电出力增大,会有效改善洪板线的过载问题,而对黄万线的传输功率影响不大,所以调节这两个电厂可以适度改善川渝联络线的不平衡问题。

#### 3.3 四川负荷对川渝断面的影响

与重庆负荷较为类似,同一片区中,各负荷节点的灵敏度较为相似,而不同片区间,负荷节点的灵敏度有明显差异。

如图 9 所示, 按照各片区将各负荷求和, 并计算各片区负荷所占四川总负荷的比例, 统计各片区的灵敏度的平均值。

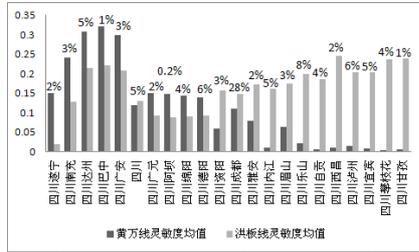


图 9 四川负荷节点按片区统计灵敏度

Fig. 9 Sensitivity of Sichuan load nodes by Area

四川各区域负荷因为地理位置以及电气距离的不同, 对于川渝联络线的灵敏度关系也不尽相同。四川遂宁、南充等区域, 对于黄万线灵敏度相对较大, 而对于洪板线较小。而对于四川甘孜、攀枝花等地区, 对于黄万线的灵敏度则非常小, 而对于洪板线的灵敏度则相对较大。与重庆负荷不同, 四川负荷主要集中在成都区域, 占四川总发电量的 28%, 而成都区域对于黄万线和洪板线的灵敏度差异不大。其他区域如遂宁、甘孜等, 对于两条联络线灵敏度的差别很大, 但其负荷相对较小, 对两条联络线的影响程度也基本相同。因此, 四川负荷对于川渝联络线的输电能力影响并不明显。

### 3.4 四川电源对川渝断面的影响

四川部分电源对于川渝联络线的灵敏度如图 10 所示, 其中金银台、临巴、亭子口等电厂, 对于黄万线灵敏度值相对较大, 而对于洪板线的灵敏度相对较小, 因此, 通过增发这些电厂的有功出力, 可以增加黄万线输电量, 但同时也会略微加重洪板线的重载问题。

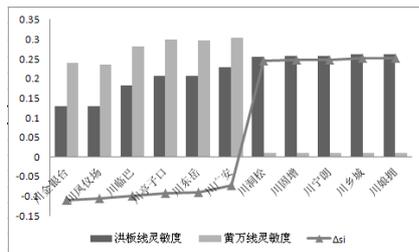


图 10 四川部分电源对于川渝联络线的灵敏度

Fig. 10 Sensitivity of some powers' in Sichuan to connections between Sichuan and Chongqing

相反, 娘拥、乡城、宁朗等电厂, 对于洪板线的灵敏度较大, 而对于黄万线的灵敏度则很小。因

此, 减发这些机组的有功出力, 可以有效地减少洪板线有功传输量, 缓解其重载问题, 同时对于黄万线有功传输的削弱较小。

### 3.5 渝鄂联络线对川渝断面的影响

重庆电网通过 500 kV 盘龙双回线和 500 kV 张恩双回线与湖北电网并联运行, 构成渝鄂断面。2013 年 7 月 15 日的典型断面, 其传输功率如表 2 所示, 功率传输方向均为由湖北向重庆供电。

表 2 渝鄂断面传输功率

联络线	P/MW
盘龙线	1 672
张恩线	1 011

对湖北电网进行等效简化, 将湖北电网等效为两个电源注入点, 分别位于重庆电网中与湖北电网相关联的“渝九盘 500-1”和“渝张家坝 500-1”两个节点。

两个等效电源节点对于川渝联络线的灵敏度结果如表 3 所示。

表 3 渝鄂断面注入功率对于川渝联络线的灵敏度

Table 3 Sensitivity of Chongqing-Hubei section of injection power for Sichuan-Chongqing line

母线名	渝鄂联络线	洪板线灵敏度	黄万线灵敏度
渝九盘500-1	盘龙线	-0.489 9	-0.560 5
渝张家坝500-1	张恩线	-0.773 7	-0.331 3

盘龙线对应的“渝九盘 500-1”对于黄万线的灵敏度绝对值要略大于洪板线, 而张恩线对应的“渝张家坝 500-1”对于洪板线的灵敏度较大, 对于黄万线的灵敏度则相对较小。

2013 年 7 月 15 日的典型断面, 其盘龙线传输功率为 1 672 MW, 而张恩线传输功率为 1 011 MW。盘龙线上过大的传输功率会减少黄万线的传输功率, 使得川渝断面的传输能力下降, 这也是 7 月 15 日黄万线出现功率倒送的重要原因之一。渝鄂断面关于川渝联络线灵敏度存在的差异, 使得两条渝鄂联络线上不同的传输功率的分配会影响川渝联络线的传输能力。

### 3.6 提高川渝电网输电能力的改善措施

对川渝电网输电能力受限成因分析结果的基础上, 结合第 2 章建立的川渝电网数学分析模型, 分别从发电优化调度、网架改造、投入 FACTS 设备等方面来提高川渝电网的输电能力。

#### 3.6.1 川渝电网发电优化调度

通过川渝电网进行发电优化调度, 合理调整川渝电网整体发电机的出力分布, 使川渝断面两条联

络线的输送功率比当前断面有所增长,基本接近川渝断面传输能力的上限。川渝电网西电东输电能力得到较大提升的同时,两条联络线的输电不平衡现象也有了明显的改善。

### 3.6.2 川渝电网网架建设改造

#### (1) 川渝断面新增联络线方案

通过新建川渝联络线的方案,在选取合适的新建联络线节点,进行互联网架改造建设后,结合发电优化调度使当前潮流断面在新网架结构中重新获得平衡,从而求得川渝电网在新建联络线后的最大输电能力。通过对比分析,综合考虑新建不同联络线后的川渝电网输电能力的提升幅度以及对原有两条联络线传输功率不平衡现象的改进程度,确定合适的新建联络线方案。

#### (2) 新建 UPFC 设备

通过内部采用三相电压型逆变器<sup>[21-23]</sup>的 UPFC 装置,设置为定功率控制模式来实现联络线的定功率控制。在进行以川渝断面输电能力达到其输电能力的上限,并且两条联络线的不平衡现象得到明显改善为目标的全局潮流优化之后,得到 UPFC 的控制目标,从而计算并调整 UPFC 的控制参数。

## 4 结论

川电东输电能力受限原因:重庆负荷中心“思源-陈家桥-板桥-圣泉”片区,对两条联络线的灵敏度差异最明显,与洪板线的灵敏度联系也最大。因此会导致川电东送的功率主要通过洪板线对重庆负荷供电,造成川渝断面传输功率不平衡、川渝断面输电能力受限;重庆电源、四川负荷、四川电源对于川渝联络线的输电能力也存在不同程度的影响;同时渝鄂断面关于川渝联络线灵敏度存在的差异,使得两条渝鄂联络线上不同的传输功率的分配会影响到川渝联络线的传输能力。

基于受限原因分析,进一步可通过重庆网架重构改善负荷分布、四川和重庆发电机组发电出力组合优化以及 FACTS 技术等来实现改善、提高川电东输电通道的输电能力。

### 参考文献

- [1] ARNOLD E, TAJIEWSKI P, WOŁOCHOWICZ P. Two methods for large-scale nonlinear optimization and their comparison on a case study of hydropower optimization[J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 1994, 81(2): 221-248.
- [2] 韩冰, 胡学英, 葛晓琳, 等. 短期梯级水电优化调度的逐次逼近法[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(7): 67-72.
- [3] HAN Bing, HU Xueying, GE Xiaolin, et al. An iterative method for short term cascade hydropower optimal scheduling[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(7): 67-72.
- [4] YANGH T, YANG P C, HUANG C L. Evolution programming based economic dispatch for units with non-smooth fuel cost functions [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1996, 11(1): 11-28.
- [5] 许丹, 夏少连, 丁强, 等. 基于启发式混合整数规划法求解大规模机组组合问题[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(21): 1-6, 13.
- [6] XU Dan, XIA Shaolian, DING Qiang, et al. Fast unit commitment based on heuristic mixed integer programming[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(21): 1-6, 13.
- [7] WONG K P, FUNG C C. Simulated annealing based economic dispatch algorithm[C] // *IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution*, IEE, 1993, 140(6): 509-515.
- [8] 吴昊, 卫志农, 王成亮, 等. 基于连续潮流综合算法的电压稳定性研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(6): 99-104.
- [9] WU Hao, WEI Zhinong, WANG Chengliang, et al. Voltage stability study based on synthesis method of continuous power flow[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(6): 99-104.
- [10] 何光宇, 郭家春, 陈雪青. 广义不均衡网络流的改进算法及其应用[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(7): 59-63.
- [11] HE Guangyu, GUO Jiachun, CHEN Xueqing. An improvement algorithm and application of generalized out of kilter network flow[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(7): 59-63.
- [12] 许立雄, 刘俊勇, 丁理杰, 等. 基于网络流介数的关键线路识别[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(5): 91-96.
- [13] XU Lixiong, LIU Junyong, DING Lijie, et al. Identification of critical lines in power grid based on network flow betweenness[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(5): 91-96.
- [14] CHEN P H, CHANG H C. Large-scale economic dispatch by genetic algorithm[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1995, 10(4): 1919-1926.
- [15] 周建平, 林韩, 温步瀛. 改进量子遗传算法在输电网规划中的应用[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(19): 90-95.

- ZHOU Jianping, LIN Han, WEN Buying. Application of improved quantum genetic algorithm in transmission network expansion planning[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 90-95.
- [11] GAING Z L. Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(3): 1187-1195.
- [12] 纪昌明, 刘方, 喻杉, 等. 基于鲑鱼效应粒子群算法的梯级水库群优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 63-68.
- Ji Changming, Liu Fang, Yu Shan, et al. The optimal operation of cascade reservoirs based on catfish effect particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(19): 63-68.
- [13] 苗峰显, 郭志忠. 灵敏度方法在电力系统分析与控制中的应用综述[J]. 继电器, 2007, 35(15): 72-76.
- MIAO Fengxian, GUO Zhizhong. A survey of sensitivity technique and its application in power systems analysis and control[J]. Relay, 2007, 35(15): 72-76.
- [14] 荆朝霞, 胡仁. 电能质量评估灵敏度分析及在改进密切值法中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 60-66.
- JING Zhaoxia, HU Ren. Sensitivity analysis for power quality evaluation and its application in modified close value method[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 60-66.
- [15] 韩军锋, 吴杰康. 基于灵敏度分析与神经网络算法的互联电力系统联络线功率调整方法[J]. 陕西电力, 2010(7): 47-51.
- HAN Junfeng, WU Jiekang. Method to adjust power of interconnected power system tie-line based on sensitivity analysis and neural network algorithm[J]. Shaanxi Electric Power, 2010(7): 47-51.
- [16] 刘升, 周京阳, 潘毅. 基于直流灵敏度法的节点间可用输电能力计算[J]. 华北电力技术, 2008(10): 1-6.
- LIU Sheng, ZHOU Jingyang, PAN Yi. Calculation of available transfer capability between nodes based on DC power sensitivity method[J]. North China Electric Power, 2008(10): 1-6.
- [17] 赵渊, 周念成, 谢开贵, 等. 大电力系统可靠性评估的灵敏度分析[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 25-30, 53.
- ZHAO Yuan, ZHOU Niancheng, XIE Kaigui, et al. Sensitivity analysis on reliability assessment of bulk power system[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 25-30, 53.
- [18] 姜涛, 李国庆, 贾宏杰, 等. 电压稳定在线监控的简化L指标及其灵敏度分析方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 13-18.
- JIANG Tao, LI Guoqing, JIA Hongjie, et al. Simplified L-index and its sensitivity analysis method for on-line monitoring of voltage stability control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 13-18.
- [19] 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: 155-162.
- [20] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 115-123.
- [21] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
- YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [22] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126, 131.
- YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126, 131.
- [23] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于PSCAD/EMTDC的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
- YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.

收稿日期: 2014-11-25; 修回日期: 2015-01-20

作者简介:

张林(1975-), 男, 博士, 研究方向为电力系统仿真及故障诊断分析; E-mail: 10681637@qq.com

沈钟浩(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为区域互联电网系统分析与控制。E-mail: 1255881273@qq.com

(编辑 魏小丽)