

# 观音岩电站送出直流工程系统谐波阻抗特性研究

李文帆<sup>1</sup> 伍文城<sup>1,2</sup> 刘小江<sup>1</sup> 杨帆<sup>1</sup> 陈磊<sup>1</sup> 曾雪松<sup>1</sup>

(1. 西南电力设计院, 四川 成都 610021; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 观音岩电站送出直流工程是南方电网异步联网工程的重要组成部分。相对于其他直流工程,该直流的特点主要有:①送受端换流站可能存在的运行方式较多;②受端换流站送出线路加装串补,且最终串补度尚未确定。针对观音岩电站送出直流工程的特点,采用 NIMSCAN 程序对该直流工程送受端换流站的系统谐波阻抗特性进行了研究。对于送端换流站,比较了联网运行方式和孤岛运行方式下的系统等值谐波阻抗特性;对于受端换流站,按照送电方向的不同对系统的谐波阻抗进行分别计算。最后,分析了换流站出线串补的串补度变化对系统谐波阻抗参数的影响。

**关键词:** 谐波阻抗; 电力系统等值; 观音岩电站; 串补度

**Abstract:** Guanyinyan HVDC project is an important part of asynchronous interconnection project in Southern Power Grid. Compared to other HVDC projects, this project has more operation modes and the lines of inverter station connected to the system contain the series compensation whose value is still in studying. Based on the characteristics of this project, the equivalent harmonic impedances of rectifier station and inverter station are studied with NIMSCAN program. For the rectifier station, the characteristics of equivalent harmonic impedance of power system under grid-connected operation mode and island operation mode are compared. For the inverter station, the harmonic impedance of system is separately calculated according to the different transmission directions. In the end, the influence of the series compensation degree on harmonic impedance parameters is analyzed.

**Key words:** harmonic impedance; power system equivalent; Guanyinyan station; series compensation degree

中图分类号: TM864 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)04-0053-05

## 0 引言

系统等值到换流站交流母线的阻抗频率特性反映了交流母线上背景谐波分布特征<sup>[1]</sup>,是确保实现换流站交流滤波器方案合理配置、保证无功补偿与控制方案优化设计的重要基础条件。在电力系统谐波阻抗测量领域,利用现代信号处理技术对电压电流信号进行分析以计算系统谐波阻抗的方法得到了较为深入地研究<sup>[2-6]</sup>。但在实际直流工程进行交流滤波器设计时,一般采用相关工具软件进行系统的谐波阻抗特性研究。目前比较常用的谐波阻抗等值工具主要有 ABB 公司的 SIMPOW 程序和加拿大 Teshmont 公司的 NIMSCAN 程序<sup>[7]</sup>。NIMSCAN 程序由于其数据与国内广泛使用的 PSD-BPA 数据结构相似,所以在中国的直流工程换流站滤波器设计中得到

了较为广泛的应用,目前 NIMSCAN 程序已被应用于中国多条已投运和在建的直流工程<sup>[7-9]</sup>。

观音岩电站送出直流是南方电网异步联网工程的重要组成部分。根据规划,云桂交流断面砚山至靖西 500 kV 线路将“ $\pi$ ”接入观音岩直流受端换流站,实现云南电网与南方主网异步联网,以降低南方电网运行风险。相对于其他直流工程,观音岩电站送出直流存在运行方式较多、受端换流站接入弱交流系统、换流站出线装设串补等特点。因此,不同于其他直流的系统谐波阻抗计算,在进行观音岩电站送出直流的换流站交流滤波器设计时,有必要针对本直流工程的运行方式及特点,对其送受端换流站的系统谐波阻抗等值特性进行更为详细地研究。

基于工程实际情况,分析观音岩电站送出直流可能出现的运行方式与特点,并针对工程特点,采用 NIMSCAN 工具,进行系统谐波阻抗特性的比较研究。

# 1 观音岩电站送出直流工程概况

观音岩电站位于金沙江中游河段,装机规模 5 × 600 MW 电站计划于 2015 年 12 月底前 5 台机组陆续投产完毕。观音岩电站电能的消纳方案是近期全部送电广西,远期需兼顾云南省负荷发展的需要。为满足电能消纳方案要求,拟通过建设 1 回 ± 500 kV/3 000 MW 直流,实现电站电力的送出。电站送出直流起点位于云南省永仁县,落点位于云南省富宁县。

根据电站消纳方案的要求,观音岩电站送出直流的送电方向有广西桂西地区和云南滇南地区,对应可能存在的主要有以下 3 种运行方式

- 1) 直流双极接入广西电网,电力全送广西;
- 2) 直流双极接入云南电网,电力全送云南;
- 3) 直流分极接入广西电网和云南电网,分极送电。

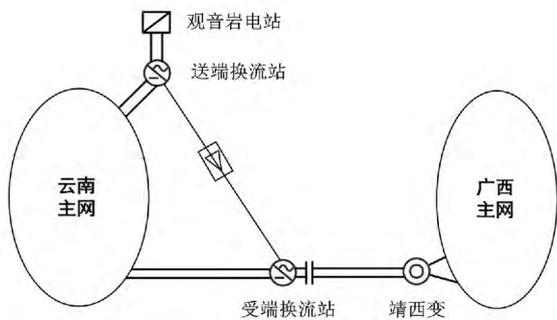


图 1 观音岩电站送出直流示意图

观音岩电站送出直流工程送受端换流站接入系统示意图如图 1 所示。由图可知,送端换流站通过两回线路与云南主网相连,存在孤岛运行的可能。而受端换流站落点的交流系统较弱,需在换流站出口线路加装串补,以提高换流母线短路比,改善换流站运行条件。目前受端换流站至靖西线路的串补度暂按 50% 进行相关的研究,最终的补偿度正在进行进一步的分析论证。

综上所述可知,观音岩电站送出直流的特点主要有以下 3 点。

- 1) 直流送端存在联网和孤岛运行的可能;
- 2) 直流受端可能存在的运行方式较多,分极送电时需接入两个同步电网;
- 3) 受端换流站落点交流系统较弱,换流站出口线路装设串补。

将通过 NIMSCAN 程序对观音岩电站送出直流的送受端换流站谐波阻抗特性进行分析,主要研究内容有以下 2 点。

- 1) 送端:对换流站联网运行和孤岛运行时的系统谐波阻抗等值分别进行研究分析;
- 2) 受端:根据送电方向的不同分别研究南方主网和云南电网等值到受端换流站的系统阻抗参数,并针对线路串补度存在变化的可能,对不同串补度下系统谐波阻抗参数的变化进行分析。

# 2 谐波阻抗计算介绍

## 2.1 NIMSCAN 计算模型概况

### 1) 发电机

在 NIMSCAN 程序中,发电机可视为一个等值阻抗的电压源,发电机的谐波阻抗模型为

$$\begin{cases} R_d(n_f) = R_d(f_0) (a_1 + b_1 n_f + c_1 n_f^2 + d_1 n_f^3 + e_1 n_f^4) \\ X''_d(n_f) = X''_d(f_0) (a_2 + b_2 n_f + c_2 n_f^2 + d_2 n_f^3 + e_2 n_f^4) \end{cases}$$

式中  $f_0$  为基频频率;  $R_d(n_f)$  为  $n_f$  次谐波下发电机电阻;  $R_d(f_0)$  为基频下发电机电阻;  $X''_d(n_f)$  为  $n_f$  次谐波下发电机次暂态电抗;  $X''_d(f_0)$  为基频下发电机次暂态电抗。

### 2) 变压器

在 NIMSCAN 程序中,变压器的谐波阻抗模型为

$$\begin{cases} R_T(n_f) = R_T(f_0) (a + b n_f^{k_1} + c n_f^{k_2}) \\ X_l(n_f) = X_l(f_0) n_f \end{cases}$$

其中  $R_T(n_f)$  为  $n_f$  次谐波下变压器的电阻;  $R_T(f_0)$  为基频下变压器电阻。

### 3) 线路

NIMSCAN 程序中,输电线路采用类似基频下常规的“π”型模型,并采用双曲函数校正。

### 4) 负荷的谐波阻抗模型

NIMSCAN 程序将负荷节点的负荷折算为对应电压下的阻抗再进行计算,具体模型为

$$\begin{cases} g(n_f) = \frac{P_0}{U^2} (a_1 + b_1 n_f + c_1 n_f^2) \\ b(n_f) = \frac{Q_0}{U^2} (a_2 + b_2 n_f + c_2 n_f^2) \end{cases}$$

式中  $n_f$  为谐波次数;  $g(n_f)$  为  $n_f$  次谐波下负荷电导;  $b(n_f)$  为  $n_f$  次谐波下负荷电纳;  $P_0$  为有功负荷;  $Q_0$  为无功负荷;  $U$  为节点电压。

### 5) 特殊物理原件模型

特殊物理元件等值采用电阻、电抗、电容数据来表征系统中某些物理元件。该模型的等值电路如图 2 所示。

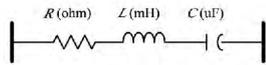


图 2 特殊物理原件模型等值电路

### 2.2 谐波阻抗扫描流程

谐波阻抗等值扫描流程如图 2 所示。整个过程可主要分为以下 4 步。

1) BPA 数据准备: 对 BPA 潮流数据和稳定数据进行预处理。主要涉及内容有冗余数据删减、BPA 数据卡片转化等。

2) NIM 数据生成: 将 BPA 数据转化为 NIM 文件。

3) 谐波阻抗计算: 采用谐波阻抗扫描程序对生成的 NIM 文件进行谐波阻抗等值扫描。

4) 结果收集: 按照需求统计收集谐波阻抗计算结果。

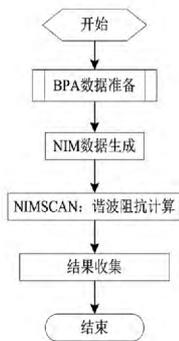


图 3 谐波阻抗扫描流程图

## 3 谐波阻抗扫描分析

影响系统谐波阻抗的主要因素有近区电网开机、负荷水平和电网结构。选择运行方式时应尽可能体现各因素对谐波阻抗变化趋势的影响。下面研究以观音岩电站送出直流工程投产的 2016 年为水平年,并考虑电源、负荷、电网结构的发展变化,对 2017 年和 2020 年的谐波阻抗也进行校核计算。以 2016 年丰大、丰小、枯大、枯小方式 2017 年丰大、丰小、枯大、枯小方式和 2020 年丰大、枯大方式为基础运行方式,并在每一种运行方式下考虑送受端换流站近区网络发生“ $N-1$ ”故障情况,对观音岩电站送

受端换流站分别进行谐波阻抗特性研究。

### 3.1 送端换流站谐波阻抗特性分析

直流换流站联网运行和孤岛运行时,直流换流站网络结构变化较大,所以对换流站联网和孤岛运行时的谐波阻抗分别进行研究。

#### 1) 换流站联网运行方式谐波阻抗等值

送端换流站联网运行时,对上述各水平年不同运行方式(考虑近区网络“ $N-1$ ”)进行谐波阻抗扫描计算,统计得到系统谐波阻抗扇形图参数列于表 1。

表 1 送端换交流侧系统谐波阻抗扇形图参数  
(联网运行) (1 p. u. = 2 756.25  $\Omega$ )

谐波次数	最小阻抗幅值/p. u.	最大阻抗幅值/p. u.	最小阻抗角 /( $^{\circ}$ )	最大阻抗角 /( $^{\circ}$ )
2 次	0.006 6	0.016 9	40.427 1	81.300 6
3 次	0.006 6	0.016 9	35.803 8	84.649 6
4 次	0.010 4	0.056 1	45.528 2	84.861 8
5 次	0.009 6	0.109 3	-46.019 5	76.846 1
6 次	0.009 2	0.112 2	-69.166 6	77.381 7
7 次	0.003 8	0.073 5	-81.810 2	30.129 0
8 次	0.001 0	0.018 5	-80.532 9	81.333 9
9 次	0.001 2	0.033 7	-25.502 8	84.439 1
10 次	0.001 0	0.071 1	-72.618 3	88.491 6
11 次	0.002 0	0.075 8	-46.985 9	88.610 2
12 次	0.003 1	0.085 8	-33.253 6	88.330 2
13 次	0.007 1	0.058 0	-30.068 8	88.074 6
高次	0.000 2	0.846 4	-88.169 7	89.425 0

#### 2) 换流站孤岛运行方式谐波阻抗等值

孤岛方式下,运行方式考虑观音岩电站到换流站全接线与  $N-1$ 。谐波阻抗等值计算结果如表 2 所示。

通过计算结果可见,换流站孤岛运行时系统的谐波阻抗特性与联网运行时差异较大,孤岛运行时各次谐波的阻抗扇形面积普遍增大,系统谐波阻抗特性较差,对换流站滤波器设计要求较高。

### 3.2 受端换流站谐波阻抗特性分析

根据直流可能存在的运行方式,分别按送电广西(南方主网系统等值到换流站母线)和送电云南(云南电网等值到换流站母线),分别进行谐波阻抗特性分析。根据受端换流站的初步研究成果,换流站至靖西线路串补目前暂按 50% 的串补度进行相关研究,最终的串补度需待进一步比较分析,所以先

按换流站至靖西线路串补度为50%时进行谐波阻抗等值研究,再对换流站出线不同串补度时系统的谐波阻抗参数变化进行分析。

表2 送端换交流侧系统谐波阻抗扇形图参数  
(孤岛运行) (1 p.u. = 2 756.25 Ω)

谐波次数	最小阻抗幅值/p.u.	最大阻抗幅值/p.u.	最小阻抗角/(°)	最大阻抗角/(°)
2次	0.032 4	0.281 6	87.522 8	88.382 2
3次	0.055 5	4.506 1	70.590 4	88.794 7
4次	0.088 4	1.834 5	-88.851 7	88.974 2
5次	0.145 2	3.792 7	-89.583 0	89.023 7
6次	0.160 6	1.948 0	-89.769 5	88.995 7
7次	0.123 0	14.025 2	-89.840 4	88.797 3
8次	0.099 3	8.536 1	-89.870 6	87.992 2
9次	0.082 6	18.183 1	-89.882 3	-51.161 5
10次	0.068 9	0.908 8	-89.884 2	-88.450 9
11次	0.059 1	0.447 1	-89.882 2	-89.323 9
12次	0.051 0	0.296 9	-89.874 6	-89.581 5
13次	0.044 1	0.220 9	-89.862 2	-89.694 4
高次	0.000 1	22.274 2	-89.850 7	89.606 9

1) 送电广西时系统谐波阻抗特性

各水平年各种方式下,考虑近区网络“N-1”时受端换流站谐波阻抗如表3所示。

表3 受端换交流侧系统谐波阻抗扇形图参数  
(送电广西) (1 p.u. = 2 756.25 Ω)

谐波次数	最小阻抗幅值/p.u.	最大阻抗幅值/p.u.	最小阻抗角/(°)	最大阻抗角/(°)
2次	0.012 1	0.054 7	11.746 7	80.384 4
3次	0.018 8	0.095 6	13.245 8	86.325 5
4次	0.031 5	0.178 5	-9.495 8	85.632 8
5次	0.022 4	0.393 2	-55.365 6	84.803 8
6次	0.041 7	0.587 8	-69.942 6	82.856 4
7次	0.016 7	0.468 2	-76.607 7	58.203 1
8次	0.019 9	0.820 0	-83.166 5	68.734 1
9次	0.010 1	0.470 6	-76.981 0	66.478 8
10次	0.013 7	0.462 5	-83.417 0	51.910 8
11次	0.010 0	0.264 8	-79.440 0	21.837 2
12次	0.007 2	0.197 4	-62.165 1	25.708 2
13次	0.007 1	0.156 5	-80.959 6	61.626 2
高次	0.000 4	1.822 1	-89.961 4	89.944 5

2) 送电云南时系统谐波阻抗特性

送电云南方向时,考虑近区网络“N-1”,云南电网等值到换流站母线的谐波阻抗特性如表4所示。

表4 受端换交流侧系统谐波阻抗扇形图参数  
(送电云南) (1 p.u. = 2 756.25 Ω)

谐波次数	最小阻抗幅值/p.u.	最大阻抗幅值/p.u.	最小阻抗角/(°)	最大阻抗角/(°)
2次	0.020 2	0.042 5	39.359 4	74.608 3
3次	0.017 0	0.076 8	-18.256 5	73.605 1
4次	0.016 6	0.084 8	-17.003 4	87.243 5
5次	0.018 6	0.196 3	-30.817 3	85.466 3
6次	0.028 0	0.211 5	-46.549 3	72.560 7
7次	0.034 1	0.237 0	-35.322 1	80.185 9
8次	0.045 6	0.446 8	-81.988 7	65.168 0
9次	0.015 2	0.171 9	-80.719 4	24.674 9
10次	0.011 6	0.313 3	-67.341 7	60.027 3
11次	0.008 1	0.179 1	-66.357 7	23.968 8
12次	0.003 7	0.090 0	-53.384 9	48.665 9
13次	0.004 2	0.095 1	-36.787 8	72.201 7
高次	0.000 7	1.236 6	-86.050 0	87.875 9

3) 换流站出线不同串补度对谐波阻抗特性的影响

由于换流站出线串补的最终补偿度尚在进行研究论证,对换流站至靖西双回线路在不同串补度下的系统等值谐波阻抗参数(最小阻抗幅值、最大阻抗幅值、最小阻抗角、最大阻抗角)进行比较,主要分析了换流站至靖西双回线路串补度由50%降至30%和10%时的系统谐波阻抗参数变化情况。

换流站至靖西双回线路不同串补度下系统等值谐波阻抗参数与50%串补度时的系统等值谐波阻抗参数之差分别如图4至图7所示。

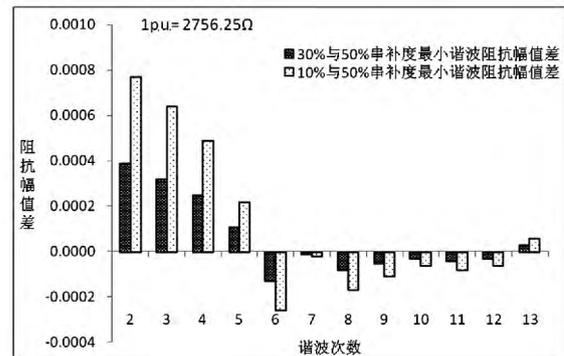


图4 各次谐波阻抗最小阻抗幅值差

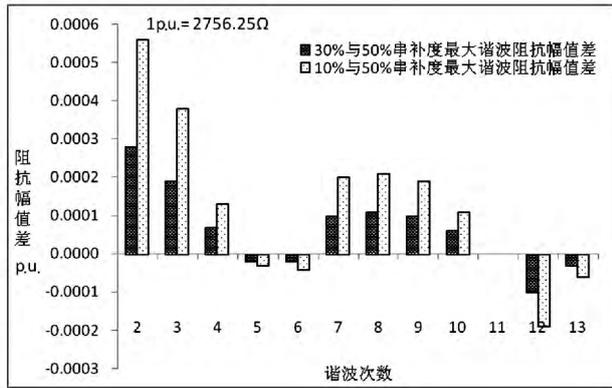


图 5 各次谐波阻抗最大阻抗幅值差

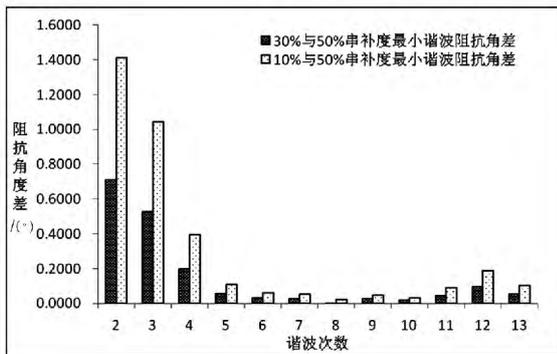


图 6 各次谐波阻抗最小阻抗角

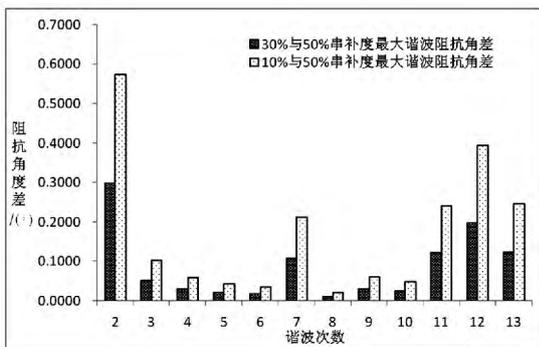


图 7 各次谐波阻抗最大阻抗角差

由图 4 至图 7 可知:

1) 从数值上看,在大部分谐波次数下换流站至靖西双回线路串补补偿度对系统等值谐波阻抗参数的影响不大;当线路串补度变化时,对 2 次谐波阻抗的参数影响比其他各次谐波阻抗大;

2) 线路串补补偿度由 50% 变化为 10% 时,系统的谐波阻抗参数变化量大致是串补补偿度由 50% 变化为 30% 时谐波阻抗参数变化量的 2 倍;

3) 换流站至靖西双回线路串补补偿度的改变对各次谐波阻抗下的参数影响没有明显规律;

4) 换流站至靖西双回线路串补补偿度由 50% 变化为 30% 和 10% 时对同次谐波的阻抗幅值影响

相同,均表现为对该次谐波阻抗最小、最大幅值的增大或减小趋势;

5) 换流站至靖西双回线路串补补偿度减小时,各次谐波阻抗最小、最大阻抗角均呈增大趋势。

## 4 结 论

观音岩电站送出直流是南方电网异步联网工程的重要组成部分,相对于其他直流工程,观音岩电站送出直流运行方式较多。通过 NIMSCAN 程序对本直流不同运行方式下送受端换流站的系统谐波阻抗等值进行了研究,主要结论如下。

1) 送端换流站孤岛运行时系统谐波阻抗特性与联网运行时差异大,对滤波器的要求较高,滤波器设计较困难;

2) 为满足电站电能的消纳,受端换流站存在双极接入广西电网、双极接入云南电网和分极接入广西电网与云南电网的运行方式,需按照送电方向的不同分别对受端换流站的系统谐波阻抗进行等值研究;

3) 换流站至靖西双回线路串补补偿度的改变对各次谐波阻抗下的参数影响没有明显规律。当串补度由 50% 分别降至 30% 和 10% 时,对大部分谐波次数下系统的谐波阻抗等值参数没有较大影响。

## 参考文献

[1] Hingorani N G, Burberry M F. Simulation of AC System Impedance in HVDC System Studies [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1970, 89(5-6): 820-828.

[2] Sumner M, Palethorpe B, Thomas D. W. P, et al. A Technique for Power Supply Harmonic Impedance Estimation Using a Controlled Voltage Disturbance [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(2): 207-215.

[3] 吕洋,徐政. 投切电容器时的电网谐波阻抗测量方法 [J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1780-1784.

[4] LV Yang, XU Zheng. Network Harmonic Impedance Measurement Using Capacitor Switching [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1780-1784.

[5] 王诗超,沈沉,程建洲. 考虑电流波动特性的系统侧谐波阻抗估计方法 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 65-70.

(下转第 69 页)

小的计算粒度可为一次完整的潮流计算。以华北调控分中心硬件配置为例,共 12 个计算资源。日前计划校核 96 个时段之间解耦,因此在华北调控分中心每个计算资源的最小计算单位为一个时段。即每个计算资源负责某一个时段的基态潮流计算和  $N-1$  开断校核。如果计算资源多,例如国调中心采用 384 个计算资源,可以将每一个时段内的潮流计算再进行并行处理。

增加并行计算个数会缩短总体计算时间,但同时会增加数据交换量,增加异常处理的难度,编程逻辑复杂。因此要根据硬件配置、软件实力综合考虑。

另外一个缩短计算时间的方法是在  $N-1$  开断时先采用直流法进行校核,过滤掉大部分无安全问题的设备开断,针对少部分直流法校核存在问题的设备开断再进行精确的潮流计算。由此而减少计算量缩短计算时间。

目前华北分中心在计算全网日前静态安全校核时计算母线约 9 329 个,支路数约 15 120 条,平均耗时 14 min。

## 5 结论与展望

国调中心开展的国分省三级日前发电计划静态安全校核是件开创性的工作,截至 2013 年年底国网系统省级及以上调度单位均参加本项工作。其意义表现如下。

(1) 为“三华”互联后电网日前发电计划安全校核工作提供技术储备。并提前开始进行工程化应用。

(2) 纵向贯通三级调度计划专业日前发电计划静态安全校核工作,真正实现了数据全网共享,践行全网预控的目标。

(3) 推进安全校核国产化的进程。本系统从硬

(上接第 57 页)

[6] 张安安,杨洪耕. 基于畸变波形同步分层估计谐波阻抗的探讨[J]. 电力系统自动化,2003,27(9):41-44.

[7] 杨志栋,李亚男,殷威扬,等.  $\pm 800$  kV 向家坝一上海特高压直流输电工程谐波阻抗等值研究[J]. 电网技术,2007,31(18):1-4.

[8] 吴晔,殷威扬. 用于直流系统动态性能研究的等值计算[J]. 高电压技术,2004,30(11):18-20.

件配置到操作系统和数据库的支撑,再到高级应用软件全部为国产品牌。

(4) 为更大范围资源优化配置提供安全校核技术支持手段。资源配置范围越大,其优化结果会越好。

(5) 提升调度计划专业的知识水平。资源配置范围越大,其优化结果会越好。但资源配置范围不可能无限放大,其规模应该与技术支持水平、专业管理深度及认识水平相适应。

(6) 为电力市场的开展提供数据、技术支持基础及流程借鉴。

### 参考文献

[1] 葛朝强,汪德星,葛敏辉,等. 华东网调日计划安全校核系统及其扩展[J]. 电力系统自动化,2008,32(10):45-48.

[2] 国调中心关于印发日前静态安全校核实用化工作推进会纪要的通知(调计(2012)267号)[R]. 2012.

[3] 关于启动三华电网静态安全校核基础数据交换工作的通知(调计(2010)326号)[R]. 2010.

[4] 关于印发《互联网联络线有功功率控制技术规范(试行)》和《电网短期负荷预测技术规范(试行)》的通知(调计(2010)33号)[R]. 2010.

[5] 关于全面推广母线负荷预测工作的通知(调计(2008)255号)[R]. 2008.

[6] 林毅,孙宏斌,吴文传,等. 日前计划安全校核中计划潮流自动生成技术[J]. 电力系统自动化,2012,36(20):68-73.

[7] 李峰,李虎成,於益军,等. 基于并行计算和数据复用的快速静态安全校核技术[J]. 电力系统自动化,2013,37(14):75-80.

[8] 房俊龙,等. 电力系统分析(上册)[M]. 北京:水利电力出版社,1995.

(收稿日期:2014-06-03)

[9] 周保荣,金小明,吴小辰,等. 糯扎渡直流送端普洱换流站孤岛方式谐波阻抗计算研究[J]. 南方电网技术,2010,4(5):24-26.

### 作者简介:

李文帆(1987),硕士,助理工程师,主要研究方向为电力系统规划与设计;

伍文城(1977),博士研究生,高级工程师,主要研究方向为电力系统规划、电力系统仿真技术及电力市场。

(收稿日期:2014-05-26)