

文章编号:1000-582X(2003)07-0066-04

# 重庆电网主网电压及无功优化问题分析\*

陈刚<sup>1</sup>, 吴迎霞<sup>1</sup>, 张继红<sup>2</sup>, 刘绍亭<sup>2</sup>

(1. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆电力通信调度中心, 重庆 400014)

**摘要:**针对重庆电网主网 220 kV 在枯水期低谷时段无功过剩, 系统电压偏高的状况, 通过计算、分析等手段对系统电网电压和无功进行全面的分析研究, 提出解决方案, 使重庆 220 kV 电网低谷电压控制在 232 kV 以下。构建重庆电网主网计算等值模型, 以有功网损最小为目标函数, 对重庆电网进行无功优化计算, 提出各种优化补偿方案, 通过计算结果综合分析各方案, 从中得出合理可行的最优方案, 并论证了发电机进相运行调控系统电压的可行性。通过对重庆电厂发电机的进相运行, 降低了系统电压, 改善了重庆电网运行性能, 加强了系统协调稳定。

**关键词:**重庆电网; 电压; 无功优化

**中图分类号:** TM714.3

**文献标识码:** A

电力系统中无功功率最优化是以电压质量为前提、利用无功调节来改变全网的无功潮流, 使系统有功网损最小<sup>[1-2]</sup>。

在电力系统中, 电压问题不仅是一个供电质量问题, 而且是关系到系统安全和经济运行的重要问题。在实际运行中, 需对电网电压进行控制和管理。1) 为保证系统静态与暂态的运行稳定性、变压器分接头的运行范围以及厂用电的正常供电, 系统的电压必须大于最低限值。2) 在正常运行时, 必须具有一定的无功功率储备, 以保证事故后的系统电压大于规定的最低限值, 防止出现电压崩溃事故。3) 保证系统电压低于规定的最大限值, 以适应电力设备的绝缘水平, 避免变压器过饱和, 并向用户提供合理的高质量电压。4) 在上述条件制约下, 尽可能降低网络中的有功损耗, 以取得较好的经济效益<sup>[3]</sup>。为此对电网进行无功电压优化, 是一个既直接影响系统电压质量, 又关系到电网经济运行的重要问题。在以往的无功电压优化计算中, 对于无功功率不足和系统电压偏低的情况一直是人们关注的问题。同样在枯水期轻负荷时, 也要考虑到无功功率过剩, 系统电压偏高的问题。合理地调节发电机出力, 有必要考虑发电机进相运行, 以及正确及时投切电容器和电抗器, 以保证系统电压不至于过高而影响系统设备, 危及系统电压安全。

根据川渝电网及二滩送电计划, 2001 年丰水期川渝电网最大交换功率为 1 200 MW, 盛夏高峰时段当全网发购电出力为 3 200 MW 时, 经无功平衡及潮流计

算, 220 kV 主网电压不会低于 220 kV。但是枯水期低谷时段因无功过剩, 凉亭地区 110 kV 系统和东新村 220 kV 网电压偏高, 部分地区电压为 233 kV。由于凉亭变压器为无载调压变压器, 当电压偏高时, 不能进行有载调压。主网电压偏高将严重影响到变压器等设备的绝缘, 以及电压质量。

针对上述现状, 应用美国 EDSA 公司的电力系统设计分析软件包 (Electrical Power Design Software), 对重庆主网进行无功优化分析, 计算分析低谷时段系统无功补偿的缺额及各发电机出力情况, 提出无功补偿方案, 保证系统 220 kV 的电压在合理范围内。

## 1 优化模型及计算

### 1.1 优化目标和约束条件

以有功网损最小为目标, 以各节点注入无功为控制变量, 计及节点电压约束时的无功优化问题可以表述为<sup>[4-5]</sup>

$$\begin{cases} \min F = \sum_{K=1}^{N_l} \Delta P_{Kloss} \\ \text{s. t. } Q_i = V_i \sum_{j=1}^{N_B} V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} - B_{ij} \sin \delta_{ij}) & i \in N_B \\ Q_k^{\min} \leq Q_k \leq Q_k^{\max} & k \in N_C \\ V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max} & i \in N_B \\ P_{gl\min} \leq P_{gl} \leq P_{gl\max} & l \in N_D \end{cases}$$

式中:  $N_l$  为总网络支路数;  $N_B$  为电网的节点总数;  $N_C$

• 收稿日期: 2003-03-18

作者简介: 陈刚 (1964-), 男, 重庆人, 重庆大学副研究员, 博士, 主要从事电力系统运行与控制、微机在电力系统中的应用、电力 MIS 系统方向的研究。

为无功补偿节点集;  $N_D$  为发电机总数;  $Q_k, Q_k^{\min}, Q_k^{\max}$  为节点  $k$  电容器投入容量及其最小最大容量;  $V_i, V_{i\min}, V_{i\max}$  为节点  $i$  电压及其上下限。

将优化模型用于重庆电网无功优化中, 其计算目标为系统网损最小, 电压约束条件为 220 kV 节点电压标么值范围在 0.98 ~ 1.045 之间。

### 1.2 优化运行及调节方式

为进行优化计算, 重庆电网有关参数设置如下:

1) 珞璜电厂为平衡节点,  $V = 0.98$ ; 2) PV 节点设置: 期望值  $V = 1.05$ , 电压标么值范围为 0.95 ~ 1.05, 重庆新厂  $P = 233$  MW, 重庆西厂  $P = 117$  MW; 3) 电厂 PQ 节点设置: 东厂  $P = 40$  MW,  $Q = 59$  Mvar; 白鹤

$P = 75$  MW,  $Q = 4$  Mvar; 狮子滩  $P = 33$  MW,  $Q = 5$  Mvar; 石板水停机未投运; 4) 全网总负荷为 1 082 MW + j234 Mvar。

根据以上重庆电网运行方式, 对重庆电网主网进行无功优化, 主要的无功调节方式为调节发电机无功出力及投切电容电抗补偿。

根据各个电厂的 PQ 曲线, 确定各发电厂无功出力调节范围为: 重庆新厂  $2 \times (-50) \sim 2 \times 105$  Mvar; 重庆西厂  $2 \times (-50) \sim 2 \times 105$  Mvar; 珞璜电厂  $2 \times (-227) \sim 2 \times 230$  Mvar。重庆电网现有电容电抗补偿设备安装位置如表 1 所示。

表 1 重庆电网电容电抗补偿设备安装位置

Mvar

站名	陈家桥	綦江	来苏	梅花山	走马羊
容量	L <sup>1</sup> 360.0(8 × 45) *	C <sup>2</sup> 48.0(6 × 8)	C 36.0(6 × 6)	C 60.0(8 × 7.5)	C 48.0(6 × 8)
站名	金家岩	大溪沟	大竹林	高峰	界石堡
容量	C 46.8(6 × 7.8)	C 57.6(8 × 7.2)	C 39.6(6 × 6.6)	L 30.0(3 × 10)	C 60.0(10 × 6)
站名	双山	东新村	黄荆堡	巴山	凉亭
容量	C54.5(4 × 8 + 3 × 7.5)	C45.0(3 × 7.8 + 3 × 7.2)	C 62.0(4 × 8 + 4 × 7.5)	C 79.2(12 × 6.6)	C 60.0(10 × 6)

说明: L<sup>1</sup> 表示已装的为电抗器; C<sup>2</sup> 表示已装的为电容器; \* 号处表示 8 组 × 45 Mvar/组。

由表 1 可以看出大多数都为电容补偿器, 电抗器只有陈家桥和高峰装设。而且高峰电抗器是固定的, 在进行无功优化调节时, 不考虑它的投切。另外假设以上各电容补偿点补偿量为电容和电抗补偿容量的最大值, 即认为以上各点既可投切电容器, 又可投切电抗器, 但二者不可同时投切。

### 1.3 优化计算方案

根据基本潮流计算结果及其分析, 通过以上调节方式的组合, 根据运行人员及专家经验以及虚拟变量法<sup>[6]</sup>初步选定几个无功补偿点, 拟定以下方案进行无功优化潮流计算。

- 1) 方案一: 仅考虑调节各发电厂无功出力。
- 2) 方案二: 考虑调节 3 个发电厂的无功, 以及在陈家桥加补偿装置。
- 3) 方案三: 考虑调节 3 个发电厂的无功, 以及在东新村、来苏、陈家桥加补偿装置。
- 4) 方案四: 考虑调节 3 个发电厂的无功, 以及在

东新村、界石堡、陈家桥加补偿装置。

5) 方案五: 考虑调节 3 个发电厂的无功, 以及在东新村、界石堡、黄荆堡、来苏、陈家桥加补偿装置。

6) 方案六: 考虑调节 3 个发电厂的无功, 以及在东新村、界石堡、黄荆堡、巴山、双山、来苏、陈家桥加补偿装置。

## 2 结果比较分析

### 2.1 发电机的电压和无功

由 EDSA 无功优化计算得出发电机电压和无功出力结果如表 2 所示。从表 2 的计算结果可知, 优化后只有重庆新厂进相, 珞璜电厂和重庆西厂无进相运行情况。方案三、方案四、方案五中重西电厂发出的无功功率较大, 且机端电压较高。总的来说, 方案一、方案二和方案六各方面情况较好。

表 2 发电机电压和无功出力

MV · A

	珞璜		重西		重新	
	V	P+jQ	V	P+jQ	V	P+jQ
优化前	0.98	365 - j16.7	1.050 0	117 + j21.0	1.050 0	233 + j44.20
方案一	0.98	365 + j62.9	1.062 5	117 + j53.7	1.013 5	233 - j48.80
方案二	0.98	365 + j59.8	1.070 9	117 + j63.0	1.012 0	233 + j4.85
方案三	0.98	365 + j52.8	1.090 7	117 + j84.1	1.013 4	233 + j2.00
方案四	0.98	365 + j69.8	1.086 4	117 + j83.7	1.013 5	233 + j10.90
方案五	0.98	365 + j63.4	1.092 6	117 + j87.4	1.021 7	233 + j24.20
方案六	0.98	365 + j67.0	1.066 4	117 + j56.2	1.029 3	233 + j41.60

## 2.2 补偿装置

补偿装置由少到多添加,尽量作到无功就地平衡及少用补偿装置的原则。无功补偿位置及容量计算结

果如表3所示。由表3可知,东新村、黄荆堡、界石堡、双山需新增一定的电抗器,其它各处依不同情况而定。

表3 无功补偿位置及容量

站名	Mvar						
	优化前	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六
陈家桥	L280.0	L280.0	L344.9	L355.5	L333.6	L315.9	L291.0
东新村				L39.1*	L19.1*	L9.7*	L10.3*
巴山							C30.2
来苏				C36.0	C6.1	L25.6*	
黄荆堡						L62.0*	L27.8*
界石堡					L20.5*	L7.4*	L46.3*
双山							L7.7*
高峰	L30.0	L30.0	L30.0	L30.0	L30.0	L30.0	L30.0

说明:\*表示需要新增的补偿容量(电抗或者电容)。

## 2.3 节点电压及网损

计算重庆电网初始潮流及优化后各节点电压和网损如表4所示,表中数值为标么值。由表4可知,各点电压标么值都已很好地控制在0.98~1.045内,但方

案三电压优化后偏高。而由各方案的网损来看,方案一、方案二和方案六网损小,方案四和方案五较小,方案三的网损较大。总的来说,考虑电压控制要求和降低网损目标,除去方案三,其它方案都可行。

表4 节点电压和网损

站名	优化前	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六
陈家桥	1.0541	1.0335	1.0329	1.0360	1.0317	1.0348	1.0341
凉亭	1.0520	1.0313	1.0307	1.0338	1.0295	1.0326	1.0319
界石堡	1.0546	1.0379	1.0383	1.0394	1.0352	1.0386	1.0358
朱家坝	1.0570	1.0401	1.0406	1.0326	1.0330	1.0382	1.0357
东新村	1.0561	1.0390	1.0395	1.0276	1.0299	1.0361	1.0335
万县	1.0413	1.0241	1.0246	1.0126	1.0149	1.0212	1.0185
高峰	1.0329	1.0158	1.0163	1.0044	1.0068	1.0130	1.0103
重西	1.0578	1.0443	1.0445	1.0449	1.0447	1.0449	1.0446
巴山	1.0546	1.0391	1.0400	1.0433	1.0390	1.0400	1.0411
双山	1.0551	1.0312	1.0335	1.0362	1.0324	1.0348	1.0350
重新	1.0543	1.0291	1.0337	1.0363	1.0328	1.0358	1.0366
来苏	1.0544	1.0339	1.0336	1.0384	1.0323	1.0352	1.0332
黄荆堡	1.0543	1.0353	1.0363	1.0386	1.0347	1.0346	1.0350
珞璜	1.0556	1.0397	1.0400	1.0417	1.0383	1.0396	1.0389
网损/MW	6.5	6.2	6.1	6.4	6.3	6.3	6.2

## 2.4 方案分析及综述

方案一中重庆新厂进相运行,优化后节点电压控制较好,网损也小,优点是无需增加补偿设备。方案二无电厂进相运行,节点电压控制也较好,所加补偿装置少,但陈家桥投入的电抗补偿器较多,系统网损相对来说最小。方案三中节点电压控制在允许范围内,新增补偿器不多,但是重庆西厂无功出力较大,而重庆新厂无功出力小,而且系统网损大。方案四中电压虽然能控制在范围之内,网损也较小,但是重庆新厂无功出力较大,机端电压较高,而且需要在东新村和界石堡增加电抗器装置。方案五同方案四差不多,无功出力大,机端电压高,也需要新增电抗器。方案六陈家桥电抗器全部投入,网损较大,所增加的补偿装置较多,并且需要在东新村、黄荆堡等多处新增电抗器。

综上所述,从发电机的电压和无功来看,方案一、方案二和方案六较好,珞璜、重西、重新电厂发吸无功

都不大,且机端电压都控制得较好,但方案六所加补偿装置较多,增加了设备投入量;方案一和方案二各方面都较好,且不需新增补偿装置,只是方案一中重新电厂需进相运行,方案二中陈家桥所投电抗器较多。总的来说,方案一较为优化,只需调节各个发电机的无功出力,也即重庆新厂进相48.8 Mvar,且不需要另外增加无功补偿设备的投入,220 kV主网电压都能合理控制在232 kV以下,网损也较小。

## 3 进相运行试验

在理论分析基础上拟对增容后的重庆电厂 QFSN-220-2型220 MW发电机进行进相运行试验,取得了满意的降压效果,并且机组即使在进相深度很深的情况下也运行稳定,无异常情况出现。表5是重庆电厂进相运行后,6、7两月重庆新厂、凉亭变电站220 kV母线电压统计值。

表5 220 kV 母线电压统计表

名称	月份	月均低谷电压/kV	月均早高峰电压/kV	月最高电压/kV
重庆新厂 220 kV 母线	6	232.01	229.01	235.30
	7	229.93	228.86	235.46
凉亭 220kV 母线	6	231.07	228.72	236.06
	7	230.39	229.18	235.40
低谷无功出力/Mvar				
重庆新厂发电机	6	52		
	7	5		
重庆西厂发电机	6	35		
	7	22		

从表5中6、7两月电压对比可得出:

低谷时段:1) 重庆新厂 220 kV 母线电压比进相运行前降低 2.08 kV;2) 凉亭站 220 kV 母线电压比进相运行前降低 0.68 kV;3) 重庆新、西两厂无功出力(典型日 4 时)比进相运行前减少 67 Mvar。

可以看出发电机进相运行是控制系统低谷时段电压的理想手段,重庆电厂进行发电机进相运行对重庆电网起到了降压效果,而且发电机运行稳定。

#### 4 结论

提高电网运行电压曾一度是无功电压管理的重点任务。随着电网日益扩大,高压输电线路增加,线路充电无功显著增加,低谷负荷时段出现了电压严重偏高的新问题。因此,研究如何解决电网低谷负荷时段电压偏高的课题,已经成为当前电网运行的紧迫任务。基本思路是吸收电网中的多余无功,常用的手段有:在电网中安装调相机、静止无功补偿器(SVC)、并联电抗器和发电机的进相运行。仅从调相调压的角度看,前两者投资太大,显然不可取。而发电机进相运行,仅需利用已有发电机的无功调节能力即可满足电压调整的要求,因而受到国内外的广泛推广。

重庆电网在高峰期时段,合理调节各个发电机出力及投切电容器,能够保证电压不低于 220 kV。而在低谷

时段,由于万州地区负荷较轻,降压运行的 500 kV 新万线充电功率大,致使系统电压偏高。通过 EDSA 软件包计算以及分析结果得出的运行优选方案,通过合理投切电抗器以及重庆电厂进相运行吸收过剩无功功率,在不增加补偿设备的情况下,就能保证主网电压在合理范围之内,同时也降低了网损,改善了电网运行性能。通过理论分析和进相运行试验论证了重庆电网发电机进相运行的可行性和最优性,调压降压效果明显,因此,重庆发电机进行进相运行不失为一种实用的、经济的措施。

#### 参考文献:

- [1] CAPASO A. On the Objective Function for Reactive Power Optimization[J]. IEEE PES Winter Meeting, 1980, 2: 3-8.
- [2] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京:水利电力出版社, 1990.
- [3] 封向东. 电力系统无功优化和电压调控方案的研究[J]. 成都科技大学学报, 1995, 3: 86-92.
- [4] 李文沅. 电力系统安全经济运行——模型与方法[M]. 重庆:重庆大学出版社, 1989.
- [5] DOMMEL H W, TINNEY W F. Optimal Power Flow Solutions[J]. IEEE Trans PAS, 1968, 6: 228-234.
- [6] 赵允新. 用虚拟变量法解无功和电压最优控制问题[J]. 重庆大学学报, 1991, 14(1): 1-5.

## Voltage and Reactive Power Optimization of Main Electric Power Network in Chongqing

CHEN Gang<sup>1</sup>, WU Ying-xia<sup>1</sup>, ZHANG Ji-hong<sup>2</sup>, LIU Shao-ting<sup>2</sup>

(1. College of Electric Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Chongqing Electric Power Dispatching and Communication Center, Chongqing 400014, China)

**Abstract:** Based on the reactive surplus of Chongqing 220 kV main electric power network under low water and low load, and on state of higher system voltage, a thorough research is done on voltage and reactive power of the system power network by means of calculation, analysis and experiments. A main network calculating equivalence model of power network in Chongqing is constructed. And reactive power optimizing calculation is figured out on the Chongqing power network on condition that the loss minimum of the active power network is object function. Several optimizing compensatory schemes are put forward. Based on the calculation result and the analysis of all schemes, the most reasonable and feasible optimizing scheme could be achieved. Meanwhile, the feasibility that the system voltage could be adjusted when generator operating under excitation was demonstrated. According to the experience of under-excitation operation of the same type units, it decreases the system voltage, improves Chongqing power network running performance, and strengthens the coordination and stabilization of system.

**Key words:** Chongqing power network; voltage; reactive power optimization

(编辑 李胜春)