

# 关于功率外送型电网孤网高频后解决措施分析

王筱<sup>1</sup>, 晁勤<sup>1</sup>, 吴茂乾<sup>1</sup>, 常喜强<sup>2</sup>, 郝红岩<sup>2</sup>

(1. 新疆大学 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 新疆电力调度通信中心 新疆 乌鲁木齐 830002)

**摘要:**为了解决外送型电网大功率外送时联络线故障跳闸造成孤网高频的隐患,提高电网的频率稳定性,首先阐述了孤网高频问题及危害,然后针对性地提出了4种措施:切机、快速调节汽门、快速切辅机(runback, RB)和快速切负荷(fast cut back, FCB),对比分析每种措施的效果及对电网和发电厂的影响。并通过仿真分析,验证了各种措施的效果和差异性,最后得出在不同运行条件下各措施的利弊及适用范围,为今后外送型电网的安全稳定运行以及经济性提供了参考。

**关键词:**孤网; 高频; 频率稳定; 切机; 汽门; RB; FCB

**Abstract:** In order to solve the hidden troubles of high-frequency in isolated power grid caused by the tripping of the link line when outputting high power and to improve the stability of grid frequency, the high-frequency problems of isolated grid are described firstly as well as its harm, and then aiming at the problems, four measures are proposed, that is, generator tripping, fast adjusting port, runback(RB) and fast cut back(FCB). The effects of each measure and their influences on power grid and power plant are compared and analyzed. Through simulation analysis, the effects and differences of each measure are validated. The merits and demerits as well as the applicable scope of each measure are obtained in different operating condition, which provides a reference for the safe and stable operation and the economy of power delivery grid in the future.

**Key words:** isolated grid; high-frequency; frequency stabilization; generator tripping; port; runback(RB); fast cut back(FCB)

中图分类号:TM773 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2011)06-0011-04

由于能源分布的不均衡,电源和负荷存在时空分布的差异性,电源和负荷增长的不同步,互联电网的规模不断扩大,电力大规模、大区域的优化调控成为现代能源优化的一部分。电力大规模远距离的传输存在一个送端系统(外送型电网),一个受端系统(受入型电网),当互联系统送电通道联系较弱时,如果两个电网间的联络线故障跳闸,该外送型电网就可能成为孤网运行,就会因突然失去大量负荷而造成发电功率过剩,若不及时采取措施,便会造成孤网内的高频问题,严重时导致电网内部的发电机组跳闸,造成先高频后低频的电网事故。因此,解决孤网内频率稳定问题,特别是高频问题,对保证电网安全稳定运行,提高输送能力和预防电网稳定破坏事故,具有重要的现实意义。

## 1 孤网高频问题分析

### 1.1 孤网概述

基金项目:新疆教育厅重点项目(XJEDU2009104)

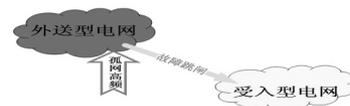


图1 外送型电网孤网示意图

孤网是孤立电网的简称,一般泛指脱离电网后形成的局部系统。孤网运行最突出的特点,是由联络线控制转变为频率控制,要求调速系统具有符合要求的静态特性、良好的稳定性和动态响应特性,以保证在用户负荷变化的情况下自动保持电网频率稳定<sup>[1]</sup>。因此,系统进入孤网运行时,根据孤网内的电力是外送型还是纳入型,系统频率会相应进入高频和低频两种状态<sup>[1]</sup>。

### 1.2 孤网高频危害

外送型电网在联络线故障跳闸后甩掉大量负荷,造成功率过剩,这必定会造成系统高频。如果该外送型电网主要由火电机组组成,面对高频故障,火电机组必须进行一系列的动作才能使频率稳定下来。如果没有应对措施,就会对发电机、汽轮机和锅炉等一系列相关设备的安全造成严重威胁。会造成汽轮发

电机的电压、频率和发电机转速不稳定,进而影响电能质量和安全系数。还会降低厂用电的可靠性,易引起全网大停电,且机组面临黑启动的危险<sup>[7,8]</sup>。

## 2 孤网高频应对措施

从孤网高频问题的分析中可以看出,造成孤网高频问题的主要原因是孤网内功率过剩,因此,解决这一问题的根本就在于快速减少孤网内的过剩功率,即降低机组出力,最终实现孤网内的功率平衡。就此讨论目前采用的 4 种降低机组出力的措施:切机、快速调节汽门、切辅机(runback, RB)和快速切负荷(fast cut back, FCB)。下面分别介绍每种措施的效果及对电网和发电厂的影响。示意图如图 2。

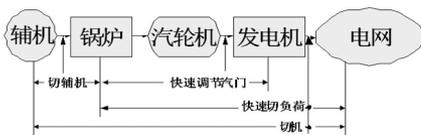


图 2 4 种措施作用点和影响范围示意图

### 2.1 切机

切机是指在发电机发生故障或者系统功率不平衡时,为保证机组的安全和系统的稳定运行而退出正在运行的故障发电机,采取的技术手段为利用稳控装置(或者机组高周保护)切机<sup>[2]</sup>。其动作开关为切除发电机升压变压器高压侧或者发电机出口侧断路器。

发电机组切除后发电厂侧和电网侧都造成一定的影响。发电机转子(转轴)和锅炉是惯性时间很大的两个环节。一旦发电机切除后,其转轴上所加的反向电磁转矩立刻消失,而汽轮机对其输出的正向转矩依然存在。这就造成发电机转轴所受的转矩发生突变,对转轴以及与其同轴汽轮机的安全造成损害<sup>[4,5]</sup>。同时,锅炉热力参数会不断上升,增加锅炉及相关辅机的运行压力,不得不释放出多余的热能,造成能源浪费<sup>[3]</sup>,需要较长时间才能恢复正常运行。

对于电网侧,切除一部分发电机,意味着向电网中注入电功率的点瞬间消失,即发电机组向电网注入的有功功率、无功功率均消失。

### 2.2 快速调节汽门

快速调节汽门是通过调节汽轮机主汽门的开度,大幅改变汽轮机的进汽量,进而改变发电机的出力,以此保障系统功率平衡和频率稳定。

由于汽轮机调速器的调节速度有限,进而限制了发电出力的调控速度。目前电厂中的主汽门开度

只能有 3 个状态:全开、半开和全闭,由此可以看出,快速调节汽门对于孤网高频问题的调频能力是有限的。另外,对于正常运行的发电机、汽轮机及锅炉等相关设备,突然将主汽门关闭一半或者完全关闭,会造成相应管道内压力突升,汽轮机叶片受力及轴向推力剧变,严重时造成通流部分磨损<sup>[4]</sup>。将主汽门完全关闭,还可能造成发电机转为电动机运行,甚至失稳。

### 2.3 切辅机

电厂中的辅机,主要有泵、风机、换热器(加热器)、管道阀门等,它们是保证发电出力的重要元件,其运行状态直接影响着发电机组的出力。当机组主要辅机故障跳闸造成机组实发功率受到限制时(协调控制系统在自动状态),为适应设备出力,协调控制系统将强制将机组负荷减到尚在运行的辅机所能承受的负荷目标值<sup>[10]</sup>。协调控制系统的该功能称为辅机故障减负荷,简称 RB。

因此可以通过减少辅机个数或出力,来降低发电机的出力。通过 RUNBACK 试验,可以得出减少辅机个数或出力与发电机出力之间的对应关系,最终实现机组出力的平缓调节,同时大幅减轻锅炉、汽轮机以及发电机的冲击,进而解决孤网高频问题<sup>[9,10]</sup>。

表 1 为某发电有限公司机组 runback 试验结果汇总表。从该表可以看出,切除辅机能够较快、较平缓地降低发电机出力,对电厂以及电网的影响最小。给水泵触发的 RB 工况对试验系统扰动最大,因为要维持汽包水位必须快速减去一定的机组负荷,维持主蒸汽压力,所以耗时最长。

图 3 为某 600 MW 汽包炉一次风机 runback 试验所得曲线。可以看出,机组实际负荷在 RB 指令下达后 4 min 即进入平稳状态,试验结果非常理想。

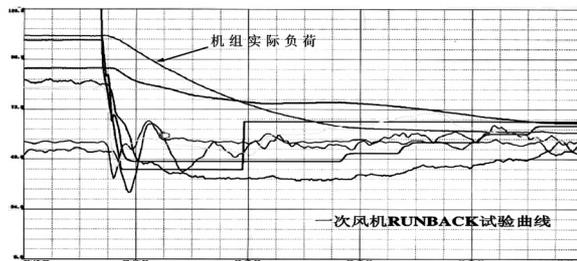


图 3 一次风机 runback 试验曲线

### 2.4 快速切负荷

快速切负荷(FCB)是指火电机组运行在某一负荷时,瞬间甩掉全部对外供电负荷,不发生锅炉主燃料跳闸(MFT),用以维持“带厂用电孤岛运行”或“停

表1 某发电有限公司机组 runback 试验结果表

试验项目	试验内容	负荷下降速度/负荷下降水平		试验结束 所用时间/负荷 变化率 < 3 MW/min	结果评定
		/( MW/min)	/MW		
磨煤机 RB 试验	磨煤机共 4 台,任跳 1 台	20	240( 72%)	8min	试验合格可投运
一次风机 RB 试验	磨煤机共 4 台,任跳 2 台	30	240( 72%)	5min	试验合格可投运
送风机 RB 试验	一次风机共 2 台,任跳 1 台	50	181( 55%)	11 min 40 sec	试验合格可投运
引风机 RB 试验	送风机共 2 台,任跳 1 台	50	165( 50%)	5 min	试验合格可投运
给水泵 RB 试验	引风机共 2 台,任跳 1 台	50	165( 50%)	5 min	试验合格可投运
	给水泵共 2 台,任跳 1 台	140	165( 50%)	25 min	试验合格可投运

机不停炉”的自动控制功能<sup>[6]</sup>。

FCB 能够快速切除电网内的过剩功率输出,在快速减负荷的同时,能够使发电机转为带厂用电孤岛运行,保护机组安全,降低运行成本,保证机组能够随时恢复对外送电,大大缩短电网恢复时间,减小电网事故面积<sup>[7,8]</sup>。

### 3 4 种措施的仿真比较

上述 4 种措施的比较如表 2 所示。

在某实际电网中,应用 PSASP6.28 仿真。故障设置为:电网在 0.5 s 时,发生外送联络线三相断线故障;在 0.7 s 时分别采用 4 种措施,在电网中的同一点监测系统频率响应以及电压响应,所得各措施对比曲线图分别如图 4、图 5。

对以上介绍的 4 种措施在调频时间数量级、涉及到的电气量、主要影响点、优点、对系统造成的扰动类型及影响范围进行比较,根据仿真分析曲线可以明显地看出区别。

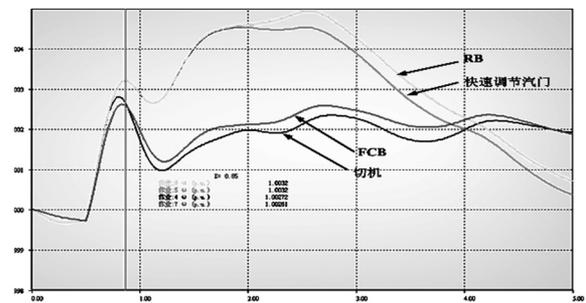


图 4 4 种措施下的系统频率响应对比曲线

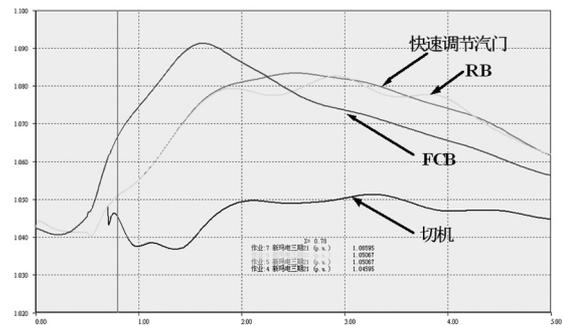


图 5 4 种措施下的系统电压响应对比曲线

表 2 4 种措施的比较

措施	快速性	涉及电气量	主要影响点	优点	扰动类型	影响范围	对发电系统的影响	电网侧
切机	毫秒级, 最快	断路器	锅炉、汽轮机、电网	快速、直接	突变	最大	需进行发电机、汽轮机、锅炉的配合,配合不好,对发电机影响大	电网侧失去有功功率和无功功率
快速调节汽门	秒级较快	主汽门	锅炉、发电机	不停机、不停炉	阶变(半关、全闭)	较大	需协调汽轮机系统	电网侧失去有功功率
切辅机	分钟级, 较慢	辅机开关	锅炉	经济、平缓调节	线性	最小	需协调辅机系统	电网侧失去有功功率
快速切负荷	秒级 较快	断路器	锅炉、汽轮机、电网	停机不停炉	突变	较大	需进行发电机、汽轮机、锅炉的配合	电网侧失去有功功率和无功功率

切机对抑制高频效果最好,但是其对枢纽点电压有一定的影响,由于程序无法模拟对汽轮机和锅炉的影响。只能通过区域稳控系统动作后对发电厂的影响进行了解。

FCB措施与切机措施的适用故障相同,仿真曲线变化趋势基本相同。但相比而言其优点在于能够实现停机不停炉,从而保证系统在需要投入机组时,机组能够快速恢复运行。另外,从图5可以看出,进行FCB后,依然能为机组所在母线的电压提供一定的支撑。但如果FCB控制策略不完善,容易造成锅炉压力突升、汽轮机超速和“鼓风”效应的出现,需要有一定的汽轮机旁路容量。因此FCB功能实现的效果取决于汽轮机凝汽器及机炉系统设备和管道的容量,这就对于锅炉和汽轮机提出了较高的要求。

快速调节汽门措施和RB措施虽然对抑制频率也有一定的效果,但是可以看出抑制幅度有限,对电压的影响程度小于前者。

通过比较可以看出,切机措施可以用在高频问题非常突出、需要快速切除机组的场合下,其效果明显,但要注意被切除机组所在地区中枢纽点母线的电压的变化,避免派生出电压问题。

快速调节汽门措施、RB措施可以在高频问题相对突出、但有一定允许时间裕度、且有功率过剩幅度在调速器、RB措施可调能力范围之内的场合适用,也可在短时不至于威胁系统安全稳定时采用,它对系统频率、电压的扰动几乎呈线性变化,但调节所需时间较长;RB措施就系统频率响应速度而言,略微滞后于前者。如对待发电厂送出线路 $N-1$ 过载、联络通道 $N-1$ 过载切机的场合。

FCB总体说来可以解决时间允许下的高频问题。从仿真结果中可以看出,其与快速调节汽门措施的变化趋势基本相同,其更大的好处是对发电机组危害最小,对于系统侧来说可以实现短时迅速并网,相对于前面三者,实现了发电厂和电网侧的双赢。但它同样和切机有类似的问题,需注意被切除机组所在地区中枢纽点母线的电压的变化,避免派生出电压问题。

4种措施各有优缺点,应针对不同的电网、不同的运行状况、不同的故障高频程度,选择不同的方案,同时也可以将几种方案优化组合,最大程度地减少对电网的影响和发电厂的影响。如采取部分切机(或FCB)、部分快关汽门减出力(或RB),在对电压要求高、敏感性强的地区采取快关汽门减出力(或RB),

在电压稳定性较高的地区,采取切机(或FCB),实现电网频率稳定及安全稳定运行。

此外,在发电厂送出,或者电网重要联络线断面送出发生 $N-1$ 过载时,也可以采取以上方案,由于线路过载在一定的程度内,是可以允许有一定的时间的,可以利用这一点,优先采取快关汽门(或RB),利用快速调节汽门和RB的优势,结合过载能力裕度时间和程度,采取完善的控制策略,减少对发电机的影响,减少对电网的影响。

## 4 结论及建议

基于外送型电网孤网运行时出现的高频问题针对性地提出了4种应对措施,详细分析了各措施的利弊并进行了对比,得出了各自的利弊及适用范围。通过比较分析,提出针对不同的问题采取不同的方案,以及可以采取的组合方案,配以完善的控制策略,不仅能有效解决孤网高频问题,充分发挥电网输送能力,还能减少对锅炉、汽轮机、发电机和电网的冲击。

同时引申到线路过载问题,在采取切机措施时,可以利用快速调节汽门和RB的优势,结合过载能力裕度时间和程度,采取完善的控制策略,保证不停机也不停炉,具有较高的经济性,能减少资源的浪费。

前面提出的4种措施各具利弊,可以为解决外送型电网的孤网高频问题、线路过载问题提供参考和借鉴,具有较高的应用价值。

### 参考文献

- [1] 蒋甲丁. 孤网运行问题探讨[J]. 新疆电力技术, 2008, 3(24): 24-26.
- [2] 周川梅, 孙斌. 贵州主网及地区电网孤网运行安全稳定措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(19): 29-32.
- [3] 范录勋. 孤立电网频率稳定问题探讨[J]. 蒲白科技, 1996(1): 33-36.
- [4] DL/T 609-1996, 300 MW级汽轮机运行导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [5] 姚金环. 对FCB若干问题的探讨[J]. 中国电力, 2007, 40(5): 59-62.
- [6] 高洵. 从“8·14”美加大停电看保电网安全的第三道防线[J]. 华北电力技术, 2004(7): 5-6, 44.

(下转第35页)

压力低闭锁时该相偷跳引起前面所述重合闸反复动作,造成断路器“跳跃”现象,也可将各相“断路器合闸压力低闭锁”接点并联接入操作箱“压力降低禁止重合”回路,当任意相断路器合闸压力低闭锁发生时即对RCS-921C重合闸放电,任意相断路器偷跳都不能再启动重合闸。该回路另外一个好处是当任意相断路器合闸压力低闭锁时,发生任何故障直接三相跳闸,不再需要等到机构非全相继电器动作跳开三相断路器,可以缩短断路器三相跳闸的时间。相反如果某相断路器合闸压力低闭锁时不采取措施,该相单相故障时线路保护选跳故障相,重合闸动作,但故障相断路器因合闸压力不足而拒合,最后才由机构非全相继电器动作跳开断路器余相,增加了断路器非全相运行的时间。虽然一相断路器合闸压力低闭锁时其他相仍然具备重合闸的条件,但是从运行角度考虑,此时也应将断路器停运检修而不是让其坚持运行,因此任一相断路器合闸压力低闭锁时即对RCS-921C重合闸放电利大于弊。增加该回路也并不会影响自适应重合闸在相间故障时的顺序动作行为,对此不再展开论述。

## 5 结 论

根据分析,将各相“断路器合闸压力低闭锁”接点并联接入操作箱“压力降低禁止重合”回路,任意相断路器发生合闸压力低闭锁时即对RCS-921C重合闸放电,增加了某相合闸压力低闭锁时再故障情况下线路保护跳开三相断路器的快速性。相对于断路器合闸压力低闭锁时不采取措施,该方案更为合理。另外,将机构非全相继电器动作后一对能够保持的动合接点接入RCS-921C装置“闭锁重合闸”开入对RCS-921重合闸放电,可以有效避免由各种原因导

致断路器合闸回路断线时再发生故障或偷跳引起的重合闸反复动作、致使断路器周期性“跳跃”的现象,而且不会因此带来其他问题。

虽然某相断路器合闸回路断线时合并发生该相故障或偷跳的可能性很小,但是并非不存在这种事故,如果前面所述的断路器类似“跳跃”现象一旦发生,极可能造成非常严重的后果,对断路器本身乃至电网的安全都构成重大威胁,因此继电保护仍不得不加以重视和防范。继电保护技术人员应针对不同断路器的特性,综合考虑二次回路,分清矛盾的主次,尽量避免不利情况的发生。另外在解决断路器问题的同时,也要注意不能引起其他问题。

### 参考文献

- [1] 肖明,卢建勇,马应成.小浪底电厂开关偷跳原因分析与处理[J].人民黄河,2010,32(8):130-131.
- [2] 于广耀,于金立.断路器偷跳远方切机研究[J].继电器,2008,36(4):81-83.
- [3] 王德志.一起330 kV断路器偷跳事件的分析及改进[J].电力系统保护与控制,2010,38(5):119-120.
- [4] 王宏茹,甘红庆,郭剑黎,等.一起开关偷跳重合闸不动作的分析和改进[J].电力系统保护与控制,2009,37(24):201-206.
- [5] RCS-921C型断路器失灵保护及自动重合闸装置技术说明书.

作者简介:

郭又华(1979)男,硕士,工程师,从事继电保护、电测仪表工作;

赵俊(1984)男,硕士,助理工程师,从事继电保护工作;

朱雨(1978)女,学士,工程师,从事继电保护管理工作。

(收稿日期:2011-06-16)

(上接第13页)

- [7] 李飏.火电机组OPC超速保护动作特性分析[J].电力安全技术,2005,7(12):21-22.
- [8] 吴琛,李文云,杨强,等.云南电网高频率问题与火电机组OPC功能协调配合研究[J].云南电力技术,2005,33(6):1-3.
- [9] 罗志浩,王达峰,姚文伟.600 MW机组RB功能试验及其分析[J].热力发电,2009,38(12):64-67.
- [10] 黄宗君,晁剑,李兴源,等.贵阳南部电网高频

问题与超速保护器仿真研究[J].电网技术,2007,31(15):26-32.

- [11] 袁季修.电力系统安全稳定控制[M].北京:中国电力出版社,1996.

作者简介:

王筱(1988)男,陕西安康人,硕士,主要从事电力系统稳定与控制方面研究;

晁勤(1959)女,教授,博士生导师,主要从事电力系统综合自动化和并网风力发电系统稳定性等方面的研究和教学工作。

(收稿日期:2011-07-26)