

南方电网失步解列装置整定方案

黄 河¹, 曾勇刚¹, 俞秋阳², 孙光辉², 李战鹰³, 张建设³

(1. 中国南方电网调度通信中心, 广东省广州市 510623; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏省南京市 211100;
3. 南方电网技术研究中心, 广东省广州市 510623)

摘要: 用 BPA(Bonneville Power Administration)程序对南方电网目前配置的失步解列系统的定值设置及协调配合进行研究,特别是研究了低压减载的影响以及判出失步后解列不同断面的效果。研究将 BPA 程序计算结果回放进实际失步解列装置以检验动作结果与分析是否相符,并建立了由南方电网交直流混合实时数字仿真(RTDS)模型、失步解列系统、功率放大器、直流控制保护装置组成的实时闭环试验系统,对研究结论进行了验证。一系列研究表明,在考虑系统中低压减载装置实际动作效果的情况下,为保证失步解列装置的正确动作,需对当前该装置的配置和整定值进行调整。

关键词: 失步解列; 低压减载; 实时仿真; 闭环测试; 协调配合; BPA 程序

中图分类号: TM712; TM762

0 引言

南方电网远距离、大容量送电,交直流并列运行,稳定问题较为突出。因此,现已配置了规模庞大的安全稳定控制系统,在直流双极闭锁等严重故障情况下切除送端机组和受端负荷;同时,还在 500 kV 各输电断面主要站点装设了失步解列装置,作为安全稳定第三道防线的一部分,在多重严重故障情况下将电网解列,防止事故进一步扩大。

目前,南方电网每年都对安全稳定控制系统进行控制策略研究与定值计算,重视出厂验收及现场调试环节,使得该系统的运行可靠性有了显著提升。但对失步解列则研究较少^[1-3],定值基本未根据电网变化进行校核,多重严重故障情况下失步解列装置能否可靠动作、各联络断面失步解列装置是否有序解列都难以确定。

在研究南方电网 2007 年运行方式时发现:若南方电网多回直流同时发生故障,会导致南方电网电压崩溃,失步解列装置因判不出振荡周期而不会动作;若此时南方电网的低压减载装置先动作,振荡中心将落在两广(广西—广东)断面,但失步解列装置装设地点的最低电压值将可能较高,仍然可能导致失步解列装置不动作。因此,2007 年南方电网采取了大量措施来防止多回直流同时闭锁,同时也对全网失步解列装置的整定方案进行了深入的研究。

本文介绍了南方电网研究失步解列整定方案的思路、仿真试验方法、结论与建议。研究工具采用中

国电力科学研究院 BPA (Bonneville Power Administration) 暂态稳定程序、实时数字仿真(RTDS)系统。采用将 BPA 程序的计算结果回放至失步解列装置来检验其动作特性,利用 RTDS 大系统模型检验失步解列系统的协调配合。

1 南方电网失步解列装置现状

2007 南方电网在 500 kV 主网两广断面、天生桥出口断面、云南出口断面、贵州与天生桥断面、贵州与广西断面的 11 个解列点装设了失步解列装置,具体配置见附录 A 图 A1。

目前国内解列装置使用的失步判据主要有 3 类^[4-7]:测量阻抗的变化规律、电压与电流相位角 ϕ 的变化规律、 $u\cos\phi$ 的变化规律。南方电网主网失步解列装置目前采用了后 2 种判据。

以上 2 种原理的失步解列装置均仅有动作范围低电压定值和振荡周期次数定值 2 项关键定值。动作范围低电压定值用于判断失步解列装置距离振荡中心的远近,设置不当有可能引起相邻解列点装置同时动作。当前多采用经验值 $0.5U_n\sim0.6U_n$ (U_n 为装置安装处母线正常电压标么值),该定值目前暂无统一的整定原则,一段时期未随电网变化进行校核。振荡周期次数定值主要协调不同断面失步解列装置,避免严重故障情况下 2 个以上断面的装置同时动作,将电网解列成多个片区。南方电网各主要断面的失步解列装置配置及整定情况见附录 A 表 A1。

2 项目研究思路

由于上述原因,2007年南方电网对全网失步解列装置的整定方案进行了深入研究,重点研究了低压减载装置动作对失步解列装置的影响。

研究的思路如下:

- 1) 仿真典型多重严重故障,观察待解列线路的 U 和 $u \cos \phi$ 等波形,判断现有定值下各失步解列装置能否动作,搜索振荡中心的位置;
- 2) 考虑低压减载装置动作的影响;
- 3) 将仿真波形回放至失步解列装置,将动作结果与人工判断进行对比;
- 4) 将上述故障的 RTDS 结果输入失步解列装置,与 BPA 程序分析结果进行比较;
- 5) 根据各种故障失步解列装置动作情况,给出定值调整建议;
- 6) 研究各种故障下解列不同断面的稳定效果。

3 基于 BPA 程序研究的方法和结论

3.1 研究的故障集

根据电网实际运行情况,选择在 2007 年丰大方式下发生有代表性的多重严重故障,应用 BPA 程序进行暂态稳定仿真计算,输出分析所需的结果。所选严重故障及排序如下:

- 1) 高肇双极闭锁,安全稳定控制(简称安稳)系统拒动;
- 2) 罗洞站梧罗双回、贺罗双回同时跳开(三相永久性故障,简称三永);
- 3) 天平双回、天换线同时跳开(三永);
- 4) 天平线单永故障,天二主保护拒动,2 s 跳所有 500 kV 间隔,0.4 s 天广、高肇、兴安直流降功率至 0.3 倍额定功率,1 s 天广、高肇、兴安直流均闭锁;
- 5) 白莞线单相短路莞城主保护拒动,2 s 跳开莞城所有 500 kV 间隔,导致天广、江城直流均 1 s 闭锁;
- 6) 安八线三永,安侧单相开关拒动;
- 7) 青河三永+兴安直流单极闭锁;
- 8) 青河三永跳双回+罗百三永跳双回+马百跳;
- 9) 息贵三永跳双回+福贵三永跳双回。

其中部分故障,如故障 8 与故障 9 均不大可能真正发生,仅为了设置一种振荡中心位置较特殊的故障形式来验证 BPA 程序分析结果的合理性。

各省(自治区,下同)低压减载比例按照 2007 年 1 月全网各轮统计比例进行模拟,限于篇幅,在此不

再列出。为简化研究,对各省内部各区域假设低压减载的轮级比例一致; du/dt 闭锁定值取 0.7, BPA 程序中无法模拟 du/dt 闭锁,因此通过观察几个重点 500 kV 站电压曲线来判断全网低压减载动作比例。这些简化会给研究带来一定误差,但不致改变各故障的振荡中心位置等关键因素。

3.2 对 BPA 程序计算结果的分析与判别

对预想故障应用 BPA 程序进行仿真计算后,提取相关的数据,按照 $u \cos \phi$ 的原理绘出暂态过程中装置预解列线路的 $u \cos \phi$ 变化曲线,其算法与解列装置中的算法一致。以故障 1 为例,不考虑和考虑低压减载时罗洞站梧罗线 $u \cos \phi$ 的变化曲线和罗洞站的电压变化曲线分别见附录 A 图 A2、图 A3。分析这些曲线并与装置的当前定值进行比较,可以判断出在此故障下罗洞站解列装置是否动作、解列的时刻;如果不动作,是何原因,是振荡周期不满足还是振荡区不在保护范围内,都可以给出较详细的信息。

在该故障下,不考虑低压减载情况下,若发生高肇直流双极闭锁安稳系统拒动, $u \cos \phi$ 的振荡波形从起始阶段的一 0.92 变化至 0.36,根据装置的内在逻辑,此时判出 1 个周期。此后 $u \cos \phi$ 又从 -0.47 变化至 0.36,此时装置已判出 2 个振荡周期,满足失步继电器的周期整定值(整定值为 2 个周期);在第 2 个振荡过程中,装置安装处的最低电压在 0.1 左右,说明振荡中心非常接近装置安装处,满足区域继电器的电压整定值(原整定值为 0.5)。综合 U 和 $u \cos \phi$ 的波形,判断装置应该在满足周期定值和电压定值后,约在第 150 个周期时发出跳闸命令。

若考虑低压减载动作,发生相同故障,如附录 A 图 A3 所示,失步振荡周期也能判出,但第 2 个振荡过程中装置安装处的最低电压上升到 0.58 左右,罗洞站失步解列装置将不能动作。由此可见,低压减载动作可能抬高受端电网电压,导致受端电网失步解列装置难以动作。而实际电网解列之前,低压减载已经大量动作(低频减载未动作),因而研究失步解列必须考虑低压减载的影响。

BPA 程序计算还得出如下结论:

- 1) 在故障 1 和故障 6 情况下,罗洞失步解列装置不会动作,低压定值调整至 0.6 后可以动作。考虑到 2007 年广东低压减载比例有所提高,罗洞失步解列装置低压定值需提高到 0.64 才能动作。
- 2) 在故障 4、故障 5 情况下,茂名失步解列装置可以动作,但玉林装置不动。如玉林低压定值抬高到 0.6,玉林失步解列装置可以动作。
- 3) 西部各站失步解列装置安装处的电压较高,

兴仁等站安装处的电压一般在 0.9 以上,罗平等站电压在 0.8 以上,一般较难动作。即使天平双回和天换线同时跳闸故障情况下,百色失步解列装置动作,对侧的罗平失步解列装置也不会动作。

4) 低压减载动作有助于判出失步周期,但会抬高部分厂站电压,西部厂站电压抬高不明显,甚至可能降低。

5) 部分多重严重故障电压跌落较快,大部分低压减载装置因 du/dt 过大而闭锁,将引起电压崩溃,失步解列装置判不出整定的失步振荡周期次数。但过多的低压减载动作可能导致电网高周切机,诱发连锁反应,对电网安全不利。

3.3 振荡中心研究

对前述故障集的计算结果,输出相关线路的两端相角差,搜索两侧相角差振荡摆开的线路,可确定为系统的振荡中心。以故障 8 为例,梧罗、来梧、平来、天平一系列线路的两侧相角差如图 1 所示,可以清楚地判断出天平线两侧的功角已经完全摆开,确定振荡中心位于天平双线上。所有故障的振荡中心见附录 A 表 A2。

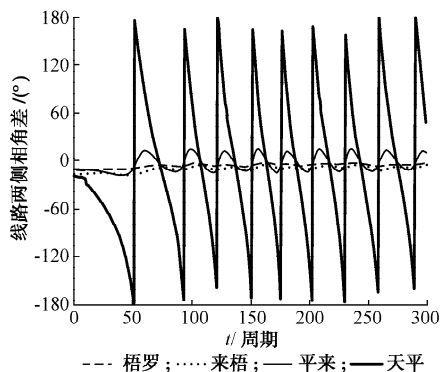


图 1 故障 8 天平线两侧相角差

Fig. 1 Phase-angle difference between two sides of transmission line in fault 8

3.4 解列点的研究及结论

两广断面 6 回 500 kV 线路连接,而云南、贵州与广西电网都仅以 3 回 500 kV 线路相连。考虑如下问题:即使振荡中心在两广断面,检测出失步后同时解列云南、贵州电网,广东、广西电网是否能够同步。

以高肇直流双极闭锁安穩系统拒动为例,罗洞、贺州、茂名失步解列装置在第 150 个周期时动作跳开梧罗、贺罗、玉茂双线,广东内部奥里油、湛江、铜鼓等机组在解列前就已与主网失步,其余广东机组在解列后能够同步;云南、贵州、广西主力机组能保持同步。

在此故障情况下,若在第 150 个周期同时解列

云南、贵州电网,则广东、广西、天生桥机组不能保持同步。

前述故障集中故障 2,4,5,7 等有类似结论。故障 3 百色站失步解列装置解列云南电网后,两广、贵州电网可同步运行。同时可以看出,所分析的几种多重严重故障在第 1 个断面失步解列装置动作后,其他断面失步解列装置不会相继动作。

进一步分析结果表明,若在振荡中心解列电网,解列后各分片电网较易保持同步;目前情况下应慎用判出失步后解列远方联系较弱电网的方法,应采取针对特定故障解列特定联络断面的方法或采用切机等再同期的方法,建议进一步研究此方法的可行性。

3.5 计算结果回放进失步解列装置的结论

将前述故障集中故障 1~6 的计算结果回放进失步解列装置,检查失步解列装置动作情况是否与观察曲线结果相符。发现波形回放的结果与分析曲线的结论基本相符,仅有部分观察曲线难以判断的特例可通过回放波形的手段检查失步解列装置是否动作。如附录 A 图 A4 所示,故障 6 百色站罗百线的曲线回放进失步解列装置可以动作,但仅观察曲线难以判断。

3.6 定值调整结论

根据 BPA 程序分析的结论,对南方电网主网 2007 年失步解列装置定值做了如下调整:

- 1) 罗洞失步解列装置低压定值提高到 0.65;
- 2) 玉林失步解列装置低压定值抬高到 0.6,并由“投跳闸”转为“投信号”;
- 3) 茂名失步解列装置由“投信号”转为“投跳闸”。

4 失步解列试验系统 RTDS 结果

4.1 RTDS 方法

鉴于目前没有真正的事事故记录可以验证 BPA 程序仿真工具对失稳后电网仿真的准确性,采用交直流混合 RTDS 模型对南方电网失步解列装置动作特性进行了研究,以验证 BPA 程序分析的结果。南方电网搭建了目前世界上最大规模的交直流混合输电系统 RTDS 模型。该模型基于南方电网 2007 年底大方式 BPA 程序模型的等值系统搭建。整个 RTDS 模型分为 10 个子系统,等值电网及各子系统划分见附录 A 图 A5。该系统的准确性已在其他项目中得到了验证,本研究重新对 RTDS 等值网对应的 BPA 程序完整数据用 BPA 程序进行分析,将其结果与 RTDS 试验得出的结论进行比较。

RTDS 试验系统包括 4 回直流(兴安直流/高肇

直流/天广直流/江城直流),其中,高肇直流连接了实际的直流控制保护装置,兴安直流、天广直流采用详细直流控制系统软件模型,江城直流采用简化的直流控制软件模型。因此,试验系统能够准确模拟交直流系统的相互影响,对模拟分析直流闭锁等故障情况下南方电网动态特性和失步解列系统动作情况具有得天独厚的便利和优势,这是一般试验工具手段难以比拟的。

同时,本次试验力求创新,采用先进的实时仿真“闭环”测试方法,即 RTDS 系统经过功率放大器向失步解列装置实时提供仿真输出的模拟电压、电流信号,失步解列装置向 RTDS 系统提供线路开关跳闸控制信号,构成一个闭环试验系统,对全网失步解列系统协调动作特性进行实时仿真研究,这对研究各断面动作顺序以及第 1 个断面解列后其余断面是否还会继续动作有较大意义。基于 RTDS 大系统模型的失步解列闭环试验系统接线如图 2 所示。

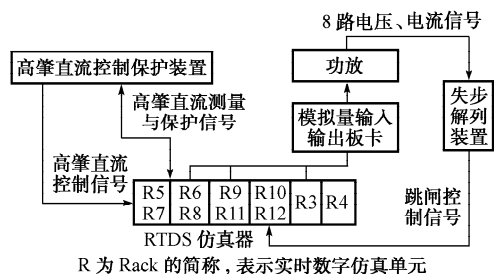


图 2 RTDS 闭环试验系统接线

Fig. 2 Diagram of RTDS closed-loop test system

本次试验模拟了云南、贵州、天生桥送电断面和广东受电断面 500 kV 交流联络线故障、直流闭锁及两者组合故障共 8 种严重故障,分别按失步解列系统开环控制和闭环控制 2 种方式,全面测试了故障下南方电网失步解列系统协调动作特性。

4.2 RTDS 结果与 BPA 程序仿真结果的比较

RTDS 与 BPA 程序分析的异同如下:

1)BPA 程序的研究结论发现,罗平、兴仁等站电压偏高较多,一般在 0.8 以上,部分故障甚至达 0.9 以上,因而电网发生前述故障集中的故障,这些站点的失步解列装置均不会动作;RTDS 结果中,这些站点电压可能降到 0.5 以下,因而这些站点失步解列装置可能动作。

2)若电网发生天平双回、天换线同时跳开故障,BPA 程序分析结果为百色站失步解列装置动作,云南电网解列后电网稳定,其余断面失步解列装置不会动作;RTDS 结果为两广断面失步解列装置动作,其后电网稳定,其他断面失步解列装置不会动作。

3)目前,RTDS 系统暂未研究低压减载的影响,

在 BPA 程序的研究结论中,低压减载的动作对失步解列装置有较大影响。

4)RTDS 和 BPA 程序研究的共同结论是:对所研究的严重故障,单一断面(多数情况下为两广断面)失步解列装置动作后,各分片电网能保持稳定,其余断面失步解列装置不会再动作。若不考虑失步解列装置出口跳线路,RTDS 结果是电网可能解列为更多小片;BPA 程序仿真结果由于送端电压维持在相对较高水平,电网仅在较少故障情况下会继续解列。

可见,个别故障后 RTDS 下解列系统动作情况与 BPA 程序仿真结果不同。经初步分析,RTDS 系统对云南、贵州等值较多,所设置负荷模型与 BPA 程序数据不一致是主要原因。BPA 程序分析结论中部分站点电压偏高的结论有待进一步研究。

5 结论与建议

本文使用波形回放技术将 BPA 程序计算结果回放进失步解列装置来检验装置定值,利用 RTDS 大系统模型、失步解列系统、功率放大器、直流控制保护装置组成的实时闭环试验系统对研究结论进行验证,这种研究方法对今后失步解列装置、安全稳定装置的配置研究和定值整定具有借鉴意义,值得进一步研究和推广。通过本次研究,分析了低压减载对失步解列装置动作行为的影响;并根据研究的结论修改了南方电网失步解列装置的定值及投退状态。主要研究结果包括:

1)对所分析的故障集,南方电网目前的失步解列配置基本满足要求,但考虑低压减载等因素后,部分厂站(如罗洞、玉林)原有定值需要调整;部分厂站(如茂名)的投退状态需调整。

2)部分多重严重故障情况下电压跌落可能较快,大部分低压减载装置可能被 du/dt 闭锁,导致低压减载装置不能动作,将引发电压崩溃,装置判不出整定的失步振荡周期次数。但过多的低压减载动作可能导致电网高频切机,诱发连锁反应,对电网安全不利;同时可能导致部分站点电压抬高过多,导致失步解列装置不能动作。

3)BPA 程序分析的结果表明:在振荡中心所在断面解列更有利于解开后的各系统的稳定。某些情况下不在振荡中心解列对电网是否更为有利,还需其他仿真工作或动模试验的进一步研究。

4)本文尝试了一些新的研究方法,如将 BPA 程序计算结果回放进实际失步解列装置检验动作结果与分析是否相符,以及利用 RTDS 大系统模型、失步解列系统、功率放大器、直流控制保护装置组成的

实时闭环试验系统研究失步解列装置闭环协调动作特性,给国内工程界提供了一些参考,为进一步深入研究第三道防线以及安稳控制系统提供了一定的方法和经验。

建议开展以下后续研究:

1)进一步研究失步解列装置布点合理性,如罗洞站电压在低压减载装置大量动作后可能偏高,是否梧州站装设失步解列装置更为合理。

2)进一步采用其他仿真工具,采用完整数据,对研究的结论进行对比分析。特别是BPA程序分析与RTDS分析不一致的结论,以及解列不同断面效果等关键结论。

3)每年对失步解列装置的定值进行滚动研究。

4)目前基建工程基本凭经验或在省区、调度管辖范围边界装设失步解列装置,较大的基建工程均应在规划设计阶段进行第三道防线的研究,以免失步解列装置布点不当导致整定困难。

5)建议国内对失步解列装置的设计原则及深度、配置原则、整定原则、协调配合原则进行研究和规范,以利电力系统第三道防线的建设和运行,确保电力系统的安全稳定运行。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 白杨,高鹏,孙光辉,等. 中国南方电网失步解列装置的配合. 电力系统自动化,2006,30(7):85-88.
BAI Yang, GAO Peng, SUN Guanghui, et al. Coordination of out-of-step separation devices in China Southern Power Grid. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(7): 85-88.
- [2] 王大光,张明建,林因,等. 福建电力系统失步和失步解列研究. 电力系统自动化,2001,25(19):41-44.
WANG Daguang, ZHANG Mingjian, LIN Yin. Study on

- breaking step and spiting of Fujian electric power system. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(19): 41-44.
- [3] 宗洪良,孙光辉,刘志,等. 大型电力系统失步解列装置的协调方案. 电力系统自动化,2003,27(22):72-75.
ZONG Hongliang, SUN Guanghui, LIU Zhi, et al. Coordination of out-of-step protection equipment in large power systems. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 72-75.
- [4] 高鹏,王建全,甘德强,等. 电力系统失步解列综述. 电力系统自动化,2005,29(19):90-96.
GAO Peng, WANG Jianquan, GAN Deqiang, et al. Review on power system out-of-step separation. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 90-96.
- [5] 高鹏,杨梅强,任祖怡. 一种捕捉失步中心的新方法. 江苏电力工程,2006,25(3):7-10.
GAO Peng, YANG Meiqiang, REN Zuyi, A new method of capturing the out-of-step central location. Jiangsu Electrical Engineering, 2006, 25(3): 7-10.
- [6] 宗洪良,任祖怡,郑玉平,等. 基于 $u \cos \phi$ 的失步解列装置. 电力系统自动化,2003,27(19):83-85.
ZONG Hongliang, REN Zuyi, ZHENG Yunping, et al. A out-of-step splitting device based on the changing track of the voltage of oscillation center. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(19): 83-85.
- [7] 高鹏,王建全,周文平,等. 捕捉失步断面的实现方案及其仿真. 电力系统自动化,2005,29(12):38-43.
GAO Peng, WANG Jianquan, ZHOU Wenping, et al. Implementation scheme and simulation on capturing the out-of-step interface. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(12): 38-43.

黄河(1972—),男,通信作者,硕士,高级工程师,主要研究方向:电力系统稳定分析控制和电网调度运行。
E-mail: huanghe@csg.cn

曾勇刚(1963—),男,博士,教授级高级工程师,主要研究方向:电力系统稳定分析控制和电网调度运行。

俞秋阳(1980—),男,硕士,工程师,主要研究方向:电力系统稳定分析控制和相关软件开发。

Study on Setting Scheme of Out-of-step Separation Systems in China Southern Power Grid

HUANG He¹, ZENG Yonggang¹, YU Qiuyang², SUN Guanghui², LI Zhanying³, ZHANG Jianshe³

(1. China Southern Power Grid Dispatch and Communication Center, Guangzhou 510623, China;

2. NARI-Relays Electric Co Ltd, Nanjing 211100, China;

3. China Southern Power Grid Technology Research Center, Guangzhou 510623, China)

Abstract: Based on time domain simulation of serious faults using BPA program, this paper introduces the research on setting and coordinating of out-of-step separation system in China southern power grid. The performance of the out-of-step system and the stability of the electrical isolated islands after separation are analyzed, especially considering the impact of under-voltage load shedding and different separation location. The simulation result waves are played back to the out-of-step separation devices by new developed instrumentation to verify the domain analysis results. For this reason, a real-time closed-loop test system is established, which is composed of real-time digital simulation model (RTDS) for AC/DC hybrid power systems of China southern power grid, out-of-step separation system, power amplifier and DC control protection devices. Finally, a suggested setting modification for current out-of-step separation system is given.

Key words: out-of-step separation; under-voltage load shedding; real-time simulation; closed-loop test; coordinating scheme; BPA program

附录 A

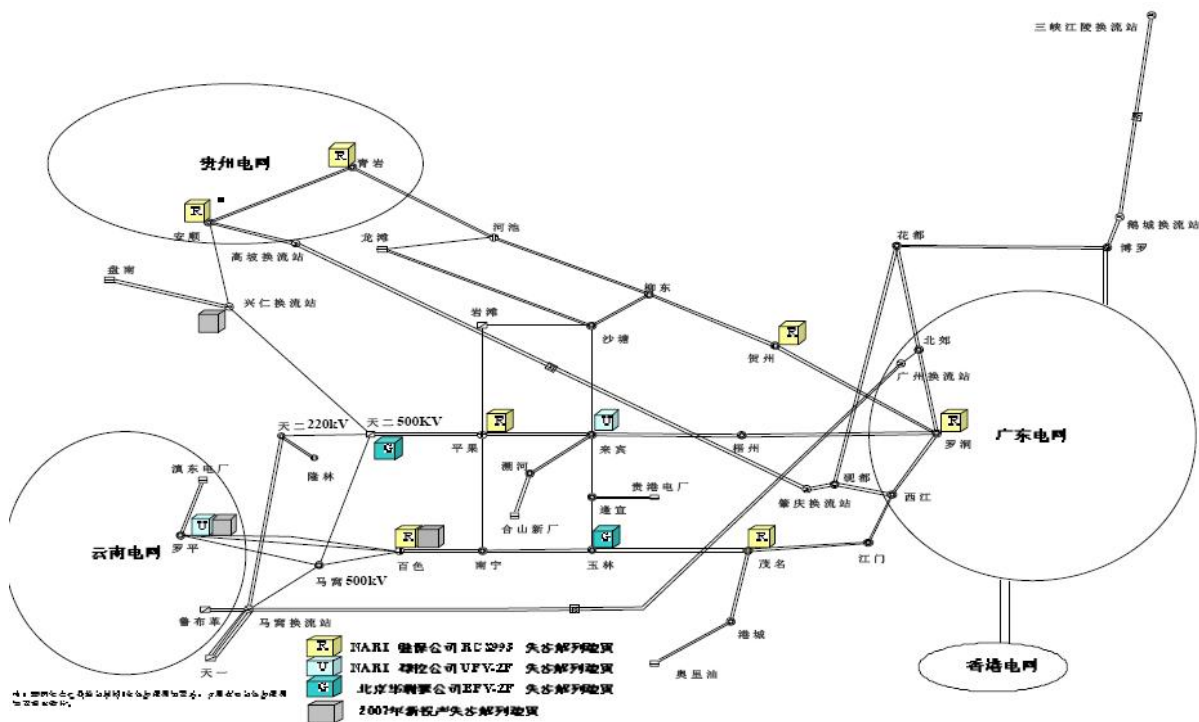


图 A1 2007 年南方电网直调系统失步解列系统

Fig.A1 Out-of-step separation devices of 2007 China Southern Power Grid

表 A1 2007 年南方电网失步解列装置配置及整定情况

Table A1 2007 out-of-step separation devices in China Souther Power Grid and their setting

断面名称	地点	定值	解列线路	正常运行要求
两广	罗洞	0.5Un, 2 周	梧罗 I、II 线	投跳闸
	来宾	0.5Un, 2 周	来梧 I、II 线 (备用解列点)	投信号
	茂名	0.5Un, 2 周	玉茂线	投跳闸
	玉林	0.5Un, 2 周	玉茂线 (备用解列点)	投信号
	贺州	0.5Un, 2 周	贺罗 I、II 线	投跳闸
天生桥出口	平果	0.5Un, 3 周	天平线	投跳闸
	百色	0.5Un, 3 周	马百线、 罗百 I、II 线	投跳闸
云南出口	罗平	0.5Un, 2 周	罗马线、 罗百 I、II 线	投跳闸
贵州与天生桥	兴仁	0.5Un, 2 周	兴天线	投跳闸
	天二	0.5Un, 2 周	兴天线 (备用解列点)	投信号
贵州与广西	青岩	0.6Un, 3 周	青河 I、II 线	投跳闸

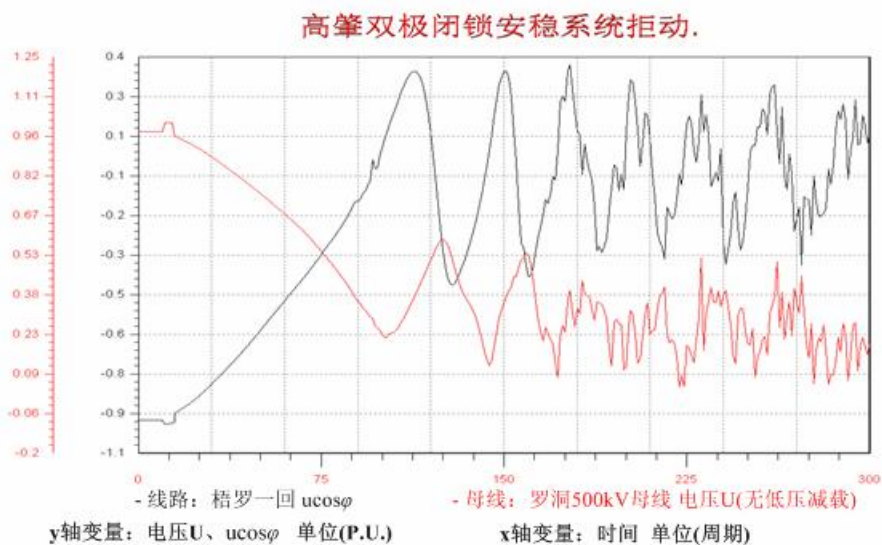


图 A2 故障 1 中不计低压减载的梧罗线罗洞侧 $ucos\phi$ 和 U 的波形曲线
Fig.A2 $ucos\phi$ and voltage curve of Wuluo transmission line without low voltage load shedding in fault 1

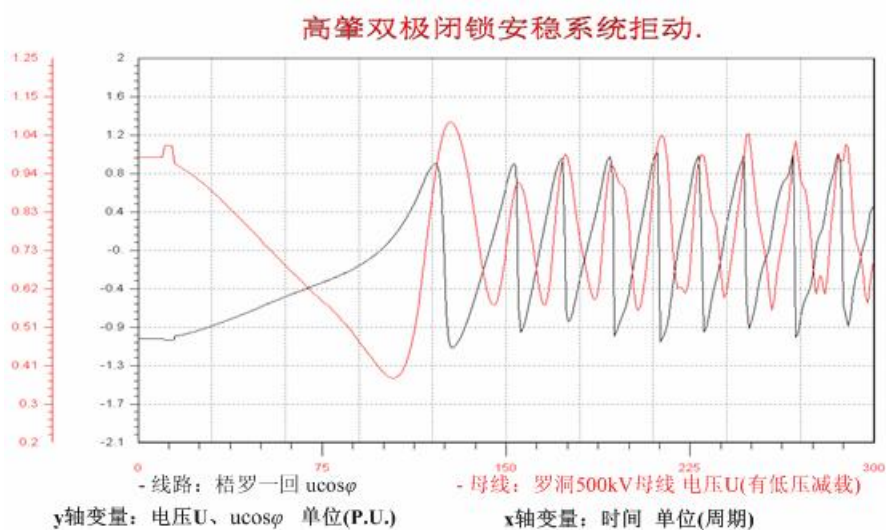


图 A3 故障 1 中计及低压减载的梧罗线罗洞侧 $ucos\phi$ 和 U 的波形曲线
Fig.A3 $ucos\phi$ and voltage curve of Wuluo transmission line with low voltage load shedding in fault 1

表 A2 振荡中心位置分布
Table A2 Location of oscillation center

故障号	振荡中心
1	梧罗双线、贺罗双线、茂江双线
2	茂江双线
3	百南双线
4	梧罗双线、贺罗双线、茂江双线
5	梧罗双线、贺罗双线、茂江双线
6	梧罗双线、贺罗双线、茂江双线；后转移至青河双线
7	梧罗双线、贺罗双线、茂江双线
8	天平双线
9	福青线

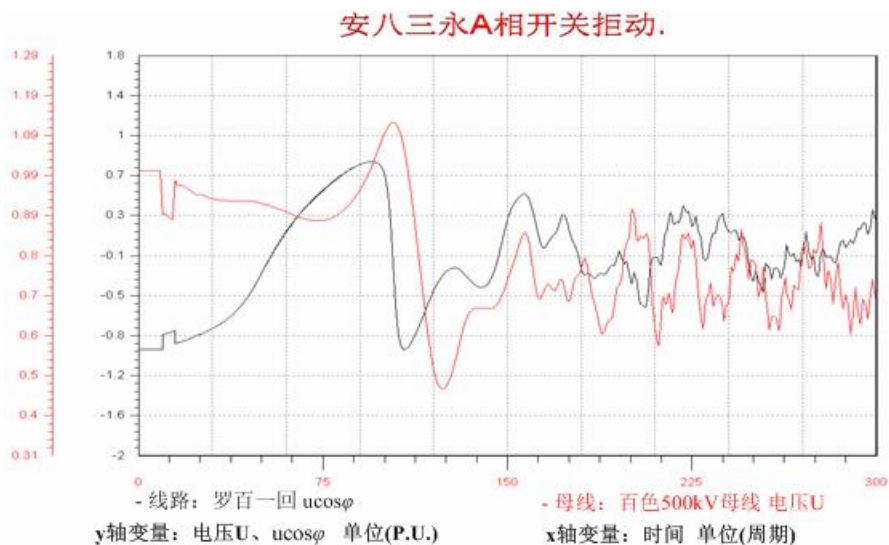


图 A4 故障 6 罗百线百色侧 $u\cos\phi$ 和 U 的波形曲线

Fig.A4 $u\cos\phi$ curve of Luobai transmission line and voltage of Baise station in fault 1

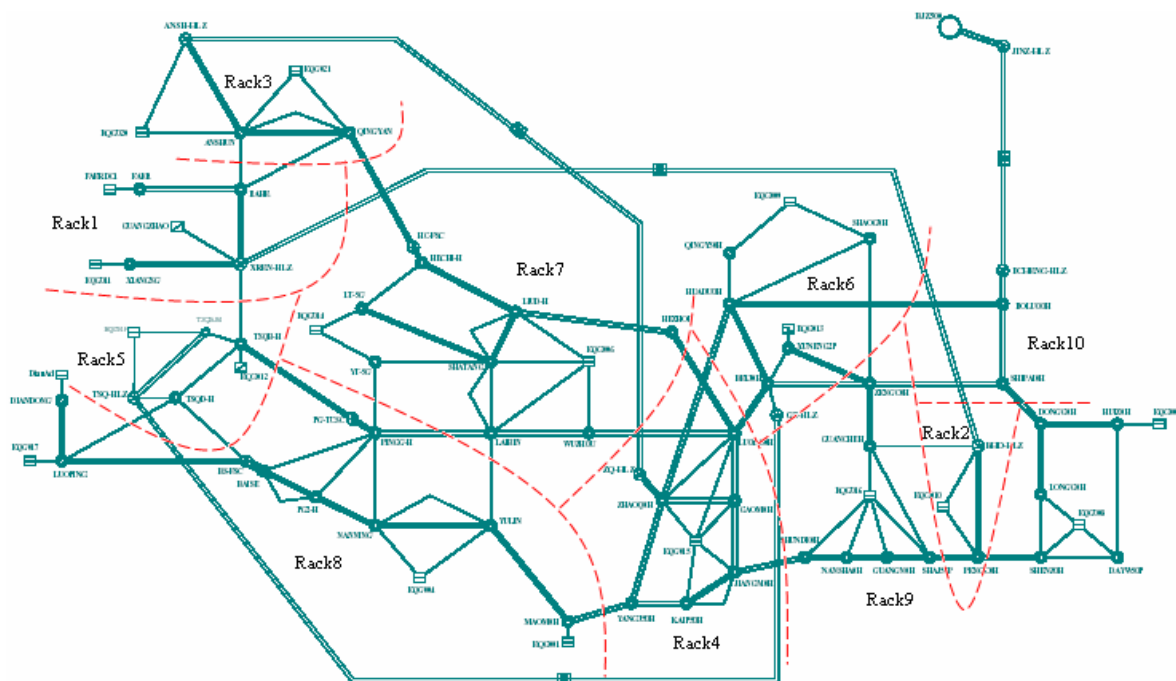


图 A5 2008 年南方电网等值电网

Fig.A5 2008 equivalent power grid of China Southern Power Grid