

# 高速斥力开关防止电力系统稳定破坏的研究 和工程实践

谢海<sup>1</sup>, 黄承伟<sup>1</sup>, 张翌晖<sup>2</sup>, 黄金<sup>1</sup>, 梁兆庭<sup>1</sup>, 陈极万<sup>1</sup>

(1.广西电网有限责任公司贺州供电局, 广西 贺州 542899; 2.广西电网有限责任公司电力科学研究院 广西 南宁 520032)

## Application Research on Current Limiting Reactor that Resolving Power System Oscillation

XIE Hai, HUANG Chengwei, ZHANG Yihui, HUANG Jin, LIANG Zhaoting, CHEN Jiwan

(1. Hezhou Power Supply Bureau, Guangxi Power Grid Co., Ltd., Hezhou 542899, China; 2.

Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Guangxi Nanning 530023, China)

**Abstract:** Oscillation is the most serious accident in power system, because it may develop into power system blackouts, and may cause serious damage to the equipment of electric power system. The initiative of solution to power system oscillation is not strong and the practical is limited. This paper put forward the new method with current-limiting reactor dissolve oscillations through to analyze the fundamental principle of oscillation and brought the cutting method and the corresponding principle at the same time. Practice has proved that the method is effective in resolving power system oscillation.

**Keywords:** high-speed switching; current limiting reactor; prevent; transient stability failure

**摘要:** 从防范、应对某地区电网发生的多起电力系统暂态稳定破坏事件着手研究, 攻克了该类稳定破坏机理揭示、防范稳定破坏的电抗值选取、高速开关研究、高速电抗器与运行继电保护配合等难题, 形成了集理论、技术、装备和应用于一体的系列研究成果。通过理论分析和仿真计算, 提出了一种全新的利用高速斥力开关防止电力系统稳定破坏方法并应用于工程实践获得圆满成功, 对省级电力系统稳定计算模型进行了必要补充, 可有效避免因系统稳定破坏可能诱发的电网大面积停电事故, 避免电网企业安全目标被打破, 确保电力系统安全稳定运行。

**关键词:** 高速开关; 限流电抗器; 防止; 暂态稳定破坏

## 1 概述

在省级稳定计算中, 负荷通常在降压变 110kV 母线处统计, 对于小水电较多的地区电网, 发电机升压变高压侧通常是 35kV 或 110kV, 常被以负的负荷计入, 机组动态特性被掩盖, 容易忽略由其引发的电力系统失稳风险<sup>[1]</sup>。

某地区电网 2013 年 8 月至 2014 年 5 月间, 连续发生三起因主变中压侧线路短路故障诱发的低压侧电源与高压侧主电网大电源之间的暂态稳定破坏事件, 导致该地区和相邻地区的有关线路出现大幅功率振荡, 随时可能诱发大面积停电事故发生, 严重危及电力系统安全运行, 同时有关继电保护因电力系统振荡失去选择性误动作<sup>[2]</sup>, 引起有关电厂发电机组甩负荷和有关用户停电, 给电厂发电机和有关用户带来了严重的冲击。为迅速避免此类严重的系统稳定破坏事件发生, 省电网电力系统稳定运行专家研究后提出对该主变的 35kV 和 10kV 系统的所有进出线全部采用继电保护无选择性 0 秒动作措施, 并于 2014 年 7 月实施。此措施虽然基本避免了稳定破坏事件发生, 但继电保护无选择性动作诱发越级误动次数却大幅增加<sup>[3]</sup>, 结果是停电用户数和发电机组甩负荷次数的大幅增加, 严重降低供电可靠性并危及发电机组安全运行, 如发电机组因频繁甩负荷导致大轴支架

震裂等，为此，电厂单位发函要求电网公司协助解决此类问题。鉴于此，我们研究出了一种全新的防止电力系统稳定破坏的方法，并投资 195 万元科技项目资金应用于工程实践且获得圆满成功<sup>[4]</sup>。

## 2.通过三卷变压器送电的系统失稳原因分析

### 2.1 发电机通过三卷变压器送电的稳定计算公式

某地区电网一次接线图如下图 1 所示，等

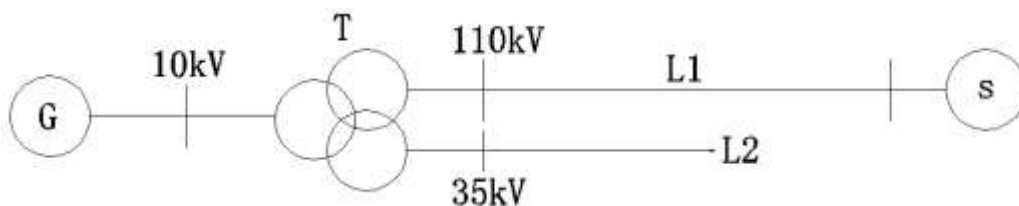


图 1 发电机通过三卷变压器送电接线图

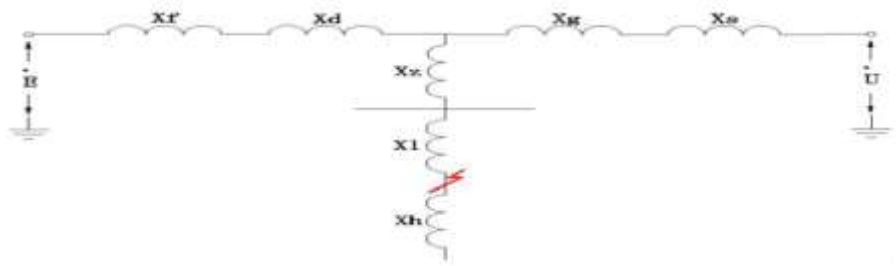


图 2 等值电路图

$$P = EU \sin \delta / X \quad (\text{式 1})$$

其中  $X$  是发电机电动势  $E$  与大电网系统之间的等值电抗，即为：

$$X = X_s + X_g + X_d + X_f + (X_s + X_g) * (X_d + X_f) / (X_z + X_l + X_h) \quad (\text{式 2})$$

$X_s$  为系统等值电抗

$X_g$  为变压器高压侧电抗

$X_d$  为变压器低压侧电抗

$X_f$  为发电机电抗

$X_z$  为变压器中压侧电抗

$X_l$  为变压器中压侧母线至出线三相短路点间线路电抗

$X_h$  为短路点后线路电抗与负荷电抗之和

### 2.2 发电机通过三卷变压器送电引起的系统稳定问题

三卷变压器从降低绝缘造价考虑，通常高、

值电路图如下图 2 所示。10kV 侧接中型发电厂，35kV 侧向附近用户供电并提供小水电上网通道，110kV 侧向主电网送电。

正常运行时，中型发电厂通过变压器的高、中压侧分别向大电网和当地用户供电。设送端发电机电动势为  $E$ ，受端大电网电压为  $U$ ，送端发电机与大电网等值发电机的功角差为  $\delta$ ，由电机学理论知道，发电机送到主系统中的有功功率由下式<sup>[5]</sup>决定：

中、低压绕组分别位于铁芯最外层、中层、最里层<sup>[6]</sup>，此结构导致其高、低压绕组的等效电抗值均为 10 欧姆多，但中压绕组的等效电抗值却为 -0.2 欧姆左右<sup>[7]</sup>。架空线每公里电抗值约 0.4 欧姆，当三卷变压器中压侧出线约 0.5 公里处发生三相短路时（35kV 及以下系统由于中性点不直接接地且相间距离小，单相接地不构成短路，两相短路极易发展为三相短路），短路点至中压侧母线的等效电抗值约  $0.4 * 0.5 = 0.2$  欧姆，此值与中压绕组的等效电抗值 -0.2 欧姆相加刚好为 0，即式（2）的分母项为 0， $X$  变为无穷大，由式（1）可知发电机向系统输出的电磁功率  $P$  下降为 0，因此功角曲线  $P$  与 0 轴重合，这是最不利系统稳定的情况。此时发电机的过剩功率将导致发电机转子加速，功角差  $\delta$  增大，如果短路故障不能快速切除，当功角差  $\delta$  增大到某一值时，发电机将与系统失去同

步运行，即暂态稳定破坏。

以变压器中压侧出线 3km 处发生三相短路为例。如上图 3 所示， $P_I$  为发电机正常运行时的功角曲线。原动机（水轮机、汽轮机等）功率直线  $P_T$  和正弦曲线  $P_I$  有两个交点。系统正常运行时， $P_I$  运行在 a 点（对应功角  $\delta_0$ ），此时原动机功率等于发电机输出的电磁功率，即  $P_T = P_{Ia}$ 。若变压器中压侧出线 3km 处发生三相短路，式(2)的分母项因少了负荷电抗而变小， $X$  变大，由式(1)可知电磁功率  $P$  下降，因此得功角曲线  $P_{II}$ ；由于惯性，发电机转速不会立即变化，因此发电机与主电网电源的功角差不会立即发生变化<sup>[8]</sup>，电磁功率便由 a 点降为

b 点运行；b 点时发电机输出电磁功率  $P_{IIb}$  小于  $P_{Ia}$ ，但因水轮机阀门不能立即关小导致原动机输入功率  $P_T$  不变，这时  $P_T$  大于  $P_{IIb}$ ，导致发电机输入功率过剩，若故障无法快速隔离，过剩功率将使发电机转子加速，因此发电机与主电网电源的功角差在此刻会发生显著变化（功角逐渐增大，发电机转子与系统同步转速的速度差也在增大），发电机电磁功率由 b 点向 c 点运行，若故障还无法及时隔离，过剩功率始终存在，发电机将不断加速，电磁功率将越过 c 点继续向前运行，最终导致功角差不断增大诱发发电机与主电网电源失去同步，即暂态失稳<sup>[9]</sup>。

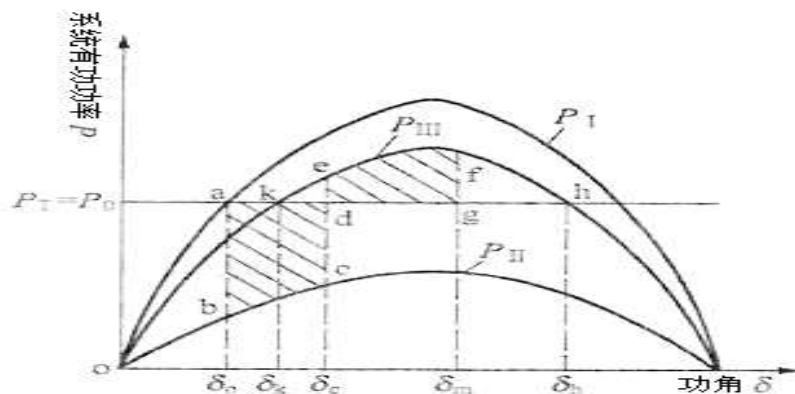


图 3 系统有功功率与功角曲线图

### 3 防止系统失稳方法

#### 3.1 变压器中压侧串入电抗器防止系统稳定破坏法

图 3 中，若 c 点时在变压器中压侧串入电抗器，式(2)的分母项因增加了电抗值而变大，从而  $X$  变小，由式(1)可知电磁功率  $P$  上升，因此功率特性变为曲线  $P_{III}$ （当串联的电抗值与负荷电抗值相等时  $P_{III}$  上升到与正常运行时的  $P_I$  重合），电磁功率由 c 点上升为 e 点运行，同样由于功角  $\delta$  不能突变，发电机输出电磁功率  $P_{IIIe}$  比原动机功率  $P_T$  大，发电机转子减速（但此时，因发电机转子速度已增加得大于同步转速，所以功角仍将继续增加），系统继续由 e 点向 f 点运行，f 点位置可根据等面积法则确定<sup>[10]</sup>。此后电磁功率将沿着  $P_{III}$  在 k 点附近来

回摆动，最后稳定在 k 点，此时  $P_k = P_T$ 。

可见，在变压器中压侧串入电抗器可以提高该类电力系统稳定水平，串入电抗值越大稳定水平越高，串入电抗器越快稳定水平也越高（因稳定破坏类型不同，本方法与传统意义的主回路串联电容器减少电抗值防止稳定破坏法截然相反<sup>[11]</sup>），这是传统教科书没有提及的内容，是本项目的创新点之一。

串入电抗器最快是永久串入，但永久串入会增加电能损耗，对于现有变压器永久串入电抗器还会引起电压下降导致用户因电压过低而无法用电，因此需要研究制造电抗器高速接入并短时运行的装置以圆满解决此问题，这是本项目的第二个创新点。

### 3.2 实现电抗器高速接入并短时运行的技术路线

如上所述，制造电抗器高速接入并短时运行的装置可解决此类电力系统暂态失稳问题。采用的技术路线是：把高速真空断路器 K1 与电抗器并联，然后串联接入变压器中压侧原有断路器至变压器套管之间，一次接线如下图 4

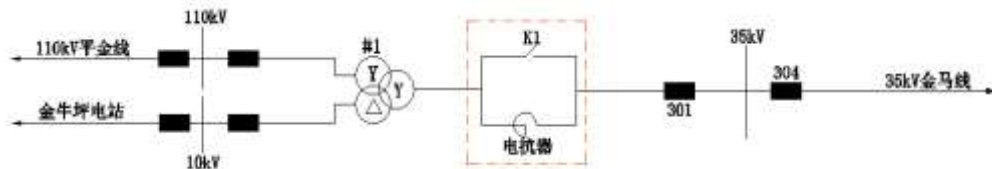


图 4 高速电抗器接入电力系统图

### 3.3 电抗器电抗值仿真计算

根据图 2 实际参数并利用图 3 曲线以及等面积法则计算需要串入的电抗值，如采用人工方法计算工作量巨大，几乎无法用人工方法完成<sup>[12]</sup>，为此，我们联合广西电科院采用中国电科院 BPA 暂态稳定仿真程序（目前电力工程普遍采用的国家权威稳定仿真计算软件）对等值电路图 2 进行有关稳定计算，用南瑞 NRTSC（Ver1.0.5）对稳定计算结果进行 prony 分析，对中压侧串入电抗器的电抗值进行了一系列的仿真计算得到：变压器中压侧出线首端三相短路后 20ms 串入 13 欧姆电抗器，短路故障在 1000ms 后切除，此时功角曲线收敛（系统稳定）如下图 5；而同样的短路点但不串入电抗器，

且短路故障提前到 80ms 切除，但功角曲线反而发散（系统失去稳定）如下图 6。中国电科院的暂态稳定仿真程序计算结果进一步证实上述电力系统稳定原因分析结论正确，详细计算结果见表 1、2。

由表 1 第一行数据可知，不串电抗器（即永久串入电抗器值为 0）时，线路始端短路时系统稳定极限切除时间为 80ms；由表 1、2 第三行数据可知，若永久或短路后 20ms 串入 13  $\Omega$  电抗器，系统稳定极限切除时间则由 80ms 提升到 1000ms 以上，该时间完全满足 35kV 出线继电保护主保护选择性动作延时要求，因此本工程采用 13  $\Omega$  电抗器。

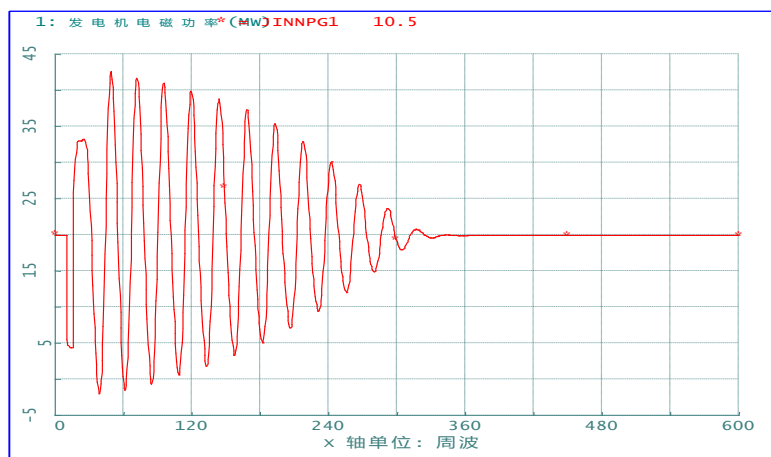


图 5：短路后 20ms 串入 13 欧姆电抗器 1000ms 切除短路故障功角曲线收敛图

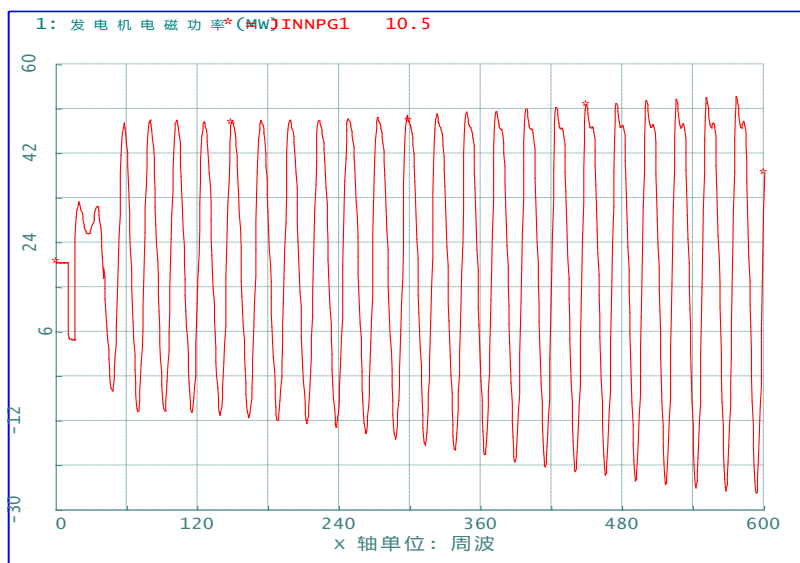


图 6: 短路后不串入电抗器 80ms 切除短路故障功角曲线发散图

表 1 永久串入电抗器时系统稳定极限切除时间表

故障线路	永久串入电抗器值 ( $\Omega$ )	极限切除时间 (ms)		
		线路始端短路	线路中间短路	线路末端短路
335kV 金马线	0	80	140	180
	2	140	180	260
	13	>1000	>1000	>1000

表 2 短路后 20ms 串入电抗器时系统稳定极限切除时间表

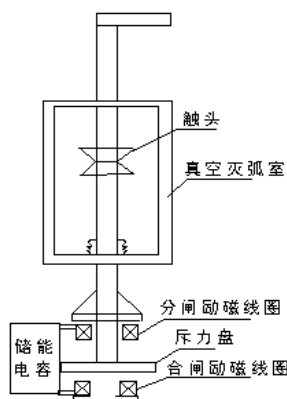
故障线路	短路后 20ms 串入电 抗器值 ( $\Omega$ )	极限切除时间 (ms)		
		线路始端短路	线路中间短路	线路末端短路
35kV 金马线	0	80	140	180
	2	120	180	240
	13	>1000	>1000	>1000

### 3.4 防止稳定破坏技术路线的实施

#### 3.4.1 采用质量更小的操作机构和特殊算法实现高速分闸

由表 1、2 可知,电抗器串入时间必须小于 80ms,且越快效果越好<sup>[13]</sup>,并需要一定裕度以避免工程计算误差等。由于常规开关机构响应时间长(约 60ms),加上继电保护动作时间,最后短路电流切除时间约 80ms,无法满足要求(本工程出线的实际最快故障切除时间达 120ms 更是无法满足要求,详见图 10。目前各电压等级的工程实际稳定计算也都采用短路电流最快切除时间 120ms 计算)。因此,我们联合有关企业研制了一款有别于传统(弹簧或液压<sup>[14]</sup>)操作机构的电磁斥力机构高速真空断路器,如图 7 所示。

分合闸操作时,控制器控制储能电容对机构合闸(分闸)励磁线圈放电,线圈会产生迅速增大的轴向磁场,同时斥力盘会感应出方向与线圈电流相反的涡流,正是涡



流导体在磁场中高速运动,开关高速分合钩(弹簧或液在相同的作用是高几倍,因此是动作速度斥力操作机构 ms 降为 3ms



图 7 电磁斥力真空开关原理及结构图

另外,为提高高速断路器保护的动作时间,本工程采用特殊软件算法使保护动作时间由 10—20ms 缩短至 3ms 左右。

此外,为提高断路器的遮断容量和减少燃弧对断路器触头的烧蚀<sup>[15]</sup>,本工程还采用相控过零技术避免传统的随机分闸,即准确计算短路电流第一半波过零时间,在短路电流过零前约 3ms 才发出分闸命令,电流过零时断口达到足够开距使断口恢复电压不能击穿断口<sup>[16]</sup>最终实现成功开断短路电流。因工频电流为正弦波,过零附件的电流瞬时值都比最大值小很多,因此可以提高断路器的遮断容量<sup>[17]</sup>;同样因为断口只有半波过零附件的小电流烧蚀量,相比传统断路器的 3 个半波以上的短路电流(时间长而且电流大)烧蚀量大幅减少,因此触头的寿命可以大幅延长<sup>[18]</sup>。

#### 3.4.2 高速断路器动作电流和返回时间设计

为不增加损耗和电压降,高速开关正常运行时不应动作,因此其动作电流定值按躲 35kV 金马线最大负荷电流整定,本工程高速开关动作电流定值整定为 1200A。在继电保护切除故障后电抗器应退出运行,因此高速开关的返回

时间按与 35kV 金马线过流 III 段保护和 1 号主变 35kV 侧开关过流保护时间配合整定(比两者中的最长者多 0.5 秒)<sup>[19]</sup>,本工程高速开关返回(投入)时间整定为 2.5 秒。

因此,采用电磁斥力机构高速断路器可实现短路故障发生后 10-15ms 内第一个短路电流半周波过零处高速串入电抗器,在 800 毫秒内由变压器中压侧出线断路器根据保护选择性要求切除短路故障,线路断路器在保护作用下再经 1000 毫秒重合(如为瞬时故障则重合成功,如为永久故障则继电保护加速 80ms 内再次切除故障并不再重合),高速断路器 K1 则在 2500 毫秒处实现自动重合,这样整个系统全部恢复正常。

## 4 工程应用成果

### 4.1 相近的短路电流冲击下暂态稳定破坏不再发生

本技术成果于 2016 年 7 月 2 日实施,实施前发生了 3 次因变压器中压侧出线短路引起暂态失稳导致的系统振荡,实施后 1 年半时间在相同线路也发生了 5 次短路,本工程装置均 5 次成功动作且 5 次避免了系统振荡发生,下面以相近的短路电流冲击实例进一步说明。图 8 是本技术应用前发生的 3 次系统振荡中的其中 1 次振荡波形图,图 9 是本技术实施后主变中压侧相同出线发生相近短路但没有引起系统振荡的波形图。图 8 中主变中压侧 35kV 金马线的短路电流半波峰值为 22.7A(二次值);而图 9 相同线路的短路电流半波峰值为 23.9A(二次值),大于前者,但图 9 并没有发生振荡,也没有发生其他保护误动。即在相同线路并且相近的短路电流冲击下,工程实施前发生了系统振荡,工程实施后不再发生振荡。本工程实践更进一步证明本技术在防止稳定破坏事件中获得圆满成功。

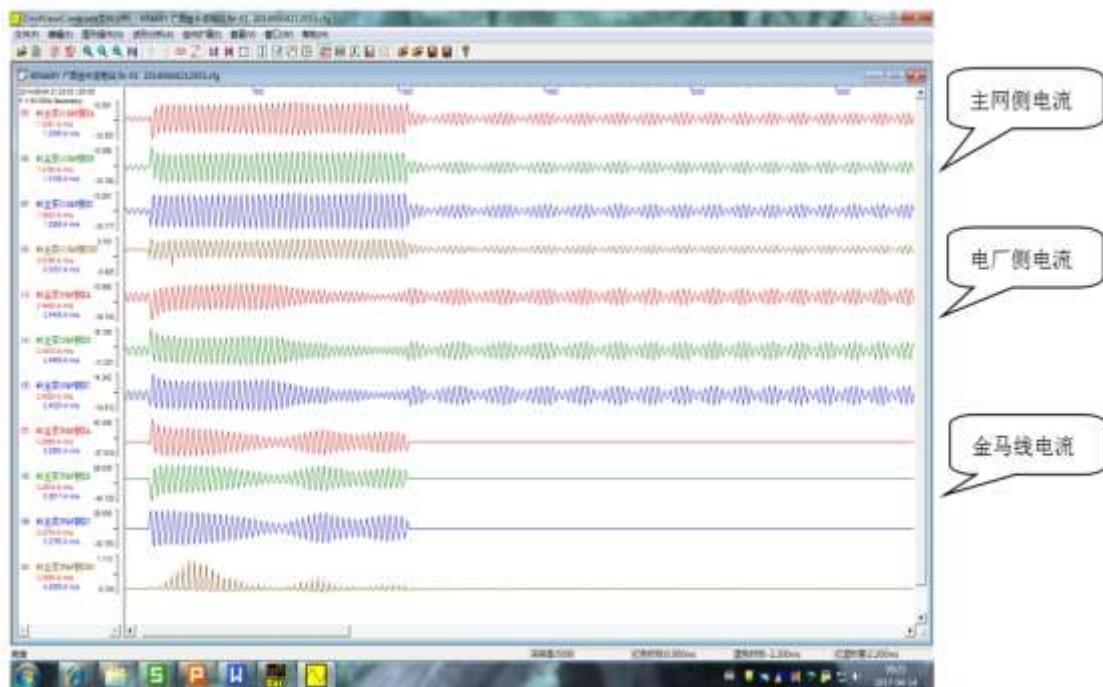


图 8 电力系统失稳引起系统振荡波形图（2014 年 6 月 4 日）

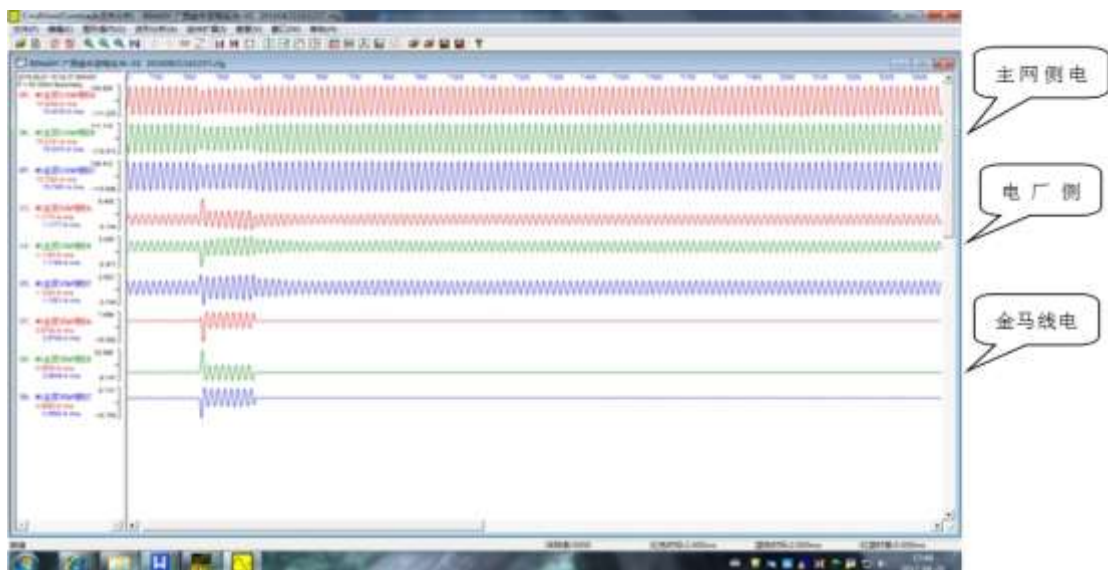


图 9 成果实施后相似短路但没有引起系统振荡波形图（2016 年 8 月 21 日）

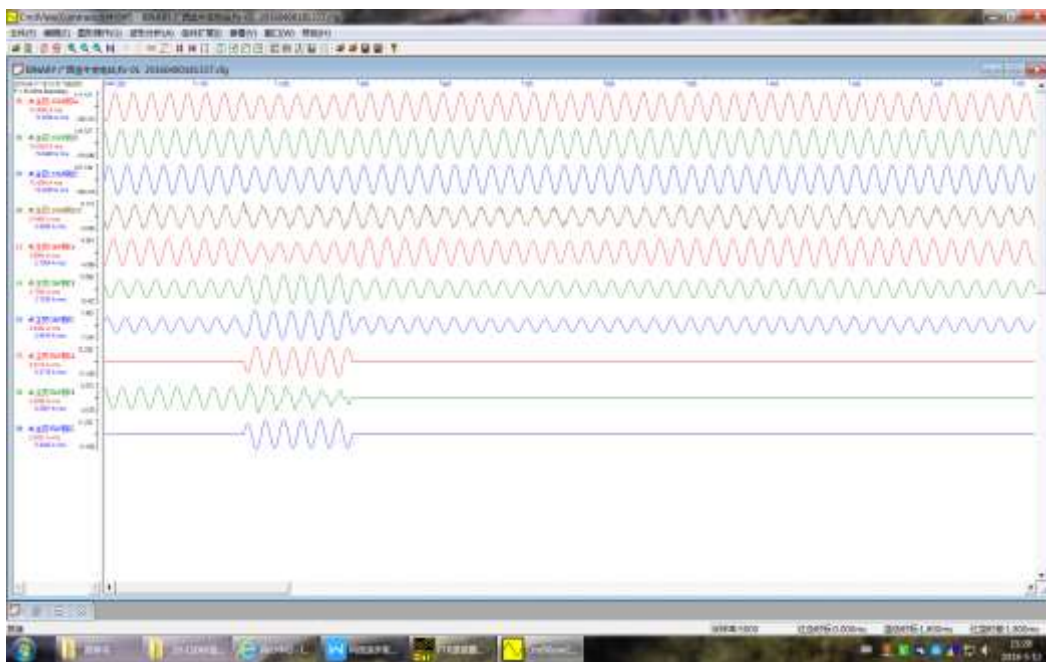


图 10 35kV 金马线过流 I 段保护动作波形图（2016 年 4 月 17 日）

#### 4.2 高速开关比常规开关切除故障快 8 倍

图 10 中第 8、10 道波形为 2016 年 4 月 17 日应用本研究成果前 35kV 金马线发生 AC 相间短路故障时，由线路保护装置的过流 I 段保护（无延时保护）驱动传统开关切除故障的事故录波图，从波形中可见短路电流持续时间 6 个周波，即利用传统保护和开关切除短路电流时间最快达 120ms。

图 9 中第 7、8、9 道波形为 2016 年 8 月 21 日应用本研究成果后 35kV 金马线（相同线路）发生三相短路事故录波图，从图中可见短路电流第一个半波很大，然后短路电流降低约一半，说明高速开关在故障后第一个半波开断成功串入电抗器，串入电抗器后短路电流下降约一半，再经过约 7 周波后因出线开关动作开断而降为 0，即高速开关仅用 15ms（因短路电流含有较大直流分量，短路电流的第一个半波周期时间不再是正弦波的 10ms 而是 15ms<sup>[20]</sup>）便完成分闸投入电抗器，切除故障时间只是传统断路器的八分之一。

可见，实践证明高速开关比常规 35kV 开关的故障切除时间快 8 倍。

## 5 结论

(1) 研究首次发现：因三卷变压器结构决定了中压侧等值电抗为负值且接近 0，导致所有发电厂通过三卷变压器送出电力的电网均存在当主变中压侧母线或出线近区短路且故障不能快速切除时会引起主变高、低侧电源暂态稳定破坏的问题（已申报国家发明专利）。

(2) 首创性研制了节能型高速防止稳定破坏装置（已获国家实用专利证书），实现了由减小暂态稳定破坏后的危害性（如目前广泛采用的振荡解列装置）跃升到不让该类暂态稳定破坏发生，完全消除了该类暂态稳定破坏对电力系统安全运行的危害。与振荡解列装置相比，具有无可比拟的优势（振荡解列装置是发电机失去稳定后解列发电机，会给电力系统带来功率振荡等冲击，并导致有功缺额，一旦大量发电机解列还可能导致电力系统崩溃）。

(3) 本研究的稳定理论分析结果（运用传统理论进行）、稳定仿真计算结果（运用中国电科院的权威仿真程序进行）、工程 1 年半的实践，所有这三者均证明利用高速断路器短时串接电抗器可以成功避免此类电力系统稳定破坏事件发生。



(4)本研究证明电磁斥力高速开关能够在半周波内切断短路电流,比常规开关速度快 8 倍左右。这不仅仅在本工程,它在其他领域如防止 220kV 及以上高压电力系统稳定破坏以及 220kV 及以下系统的开关遮断容量不足、变压器热稳定时间不满足运行要求等方面均具有广阔应用前景,目前 220kV 高速真空断路器研究已获广西电网公司 40 万元前期科研经费实施。

(5)电力系统稳定破坏会导致大幅功率振荡,常会诱发变压器和线路等元件过载、保护误动,以及大量发电机组解列等情况,是大面积停电事故的诱因之一,因此稳定破坏是非常严重的问题,南方电网公司也会对所有稳定破坏的事件督办解决。本研究圆满解决了其中一类一直未被人们熟知的稳定破坏问题,有效避免可能发生的电网大面积停电事故,可有效避免南方电网公司安全目标被打破,将产生巨大社会经济效益。

## 6 建议

对于小水电较多的地区电网,在省级稳定计算中,应计及中小型发电机组的动态特性,避免忽略导致不能及时发现电力系统的潜在失稳风险。

## 参考文献

- [1]张翌晖, 变压器中压侧限流电抗器的应用及实效分析[J]. 广西电力, 2018, (01):43-46.
- [2]张保会. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [3]贺家李, 李永丽, 董新洲等. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

- [4] 陈波, 一种电力系统振荡抑制方法的探讨[J]. 广西电力, 2017, (01):35-37.
- [5]符国绣. 城市电力网[M]. 广州: 广东科技出版社, 2004.
- [6] 陈曾田. 电力变压器保护[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989. 电力系统
- [7] 吴必信. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [8] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [9] 李焕明. 电力系统分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [10] 韦钢. 电力系统基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [11] 王新学, 电力网及电力系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [12] 杨以涵. 电力系统基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [13] 栗然, 黄丽华, 葛丽娟等. 电力系统分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [14] 熊信银. 发电厂电气部分[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [15] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术(第三版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [16] 张一尘. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015:34.
- [17] 赵玉林. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008:67-71.
- [18] 马永翔. 高电压技术[M]. 北京: 北京大学出版社, 2009.
- [19] 天津大学. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 电力工业出版社, 1980.
- [20] 刘耀年. 电路[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

## 作者简介:

谢海(1961-), 男, 广西梧州, 高级工程师, 学士, 研究方向为高电压技术、电网调度运行技术、继电保护技术。

黄承伟(1984-), 男, 广西贺州, 工程师, 研究方向为风险体系管理、安全管理。

张翌晖(1981-), 男, 广西南宁, 高级工程师, 博士, 研究方向为高电压技术、电网调度运行技术、继电保护技术。