

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190522

基于视在阻抗角的失步解列判据改进研究

瞿艳霞¹, 时伯年¹, 刘志超¹, 张岩², 迟忠君²

(1. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085; 2. 国家电网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075)

摘要: 当电网结构存在隐患时, 易因事故诱发系统失步振荡。阻抗角失步解列判据作为应用最广的失步判据, 其优势十分明显, 同时也存在一定缺陷, 即在短路暂态过程中易发生误判。通过对典型视在阻抗角判据理论的深入研究, 提出一种采用电压包络线上沿门槛作解锁条件的判据改进方案。该方案能严格区分短路与失步过程, 提升视在阻抗角失步判据对特定工况及新型电网结构的适应性。最后在 PSCAD/EMTDC 中通过简化的实例模型验证改进判据的有效性。

关键词: 暂态稳定; 失步解列; 视在阻抗角; 判据

Improvement of out-of-step separation criterion based on apparent impedance angle

QU Yanxia¹, SHI Bonian¹, LIU Zhichao¹, ZHANG Yan², CHI Zhongjun²

(1. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China;

2. State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China)

Abstract: When there are hidden troubles in power grid structure, it is easy to cause system out-of-step oscillation due to accidents. Impedance angle out-of-step separation criterion is the most widely used criterion. Its advantages are obvious, but there are also some shortcomings, that is, it is easy to misjudge in short-circuit transient process. In this paper, based on the in-depth study of the typical apparent impedance angle criterion theory, an improved criterion using maximum threshold of voltage envelope as unlocking condition is proposed. The scheme can strictly distinguish short circuit from out-of-step process, and improve the adaptability of apparent impedance angle out-of-step criterion to specific operating conditions and new power grid structure. Finally, the validity of the improved criterion is verified by a simplified example model in PSCAD/EMTDC.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China “Framework Research and Design of Super Large-scale Power Grid System-level Control and Protection Technology” (No. SGBJDK00KJJS900088).

Key words: transient stability; out-of-step separation; apparent impedance angle; criterion

0 引言

能源分布与电力消费的不平衡决定了建设特高压全国互联电网是我国电网发展的趋势^[1-6]。随着互联电网的发展, 当电网结构存在隐患, 如长距离大负荷输电、电磁环网、部分区域电网间弱联系、电网无功补偿容量不足、负荷中心的电压支撑不够等, 易因短路故障或连锁事故诱发失步振荡^[7-12]。失步解列装置作为保障电力系统安全稳定运行的第三道防线^[9], 其作用是在关键时刻防止事故扩大, 防止

系统发生频率及电压崩溃或其他长期稳定破坏事故, 避免大规模停电的发生^[13]。

现阶段失步解列工程配置应用以基于就地信息的失步判别为主^[14]。目前基于就地信息的失步解列装置的判据主要有视在阻抗角判据、 $ucos\phi$ 判据、功角判据^[15]、阻抗循序式判据等, 其中视在阻抗角判据因具有能够适应复杂的电网结构和多变的运行方式、且整定方便, 可区分短路、同步振荡和失步振荡等优点, 在我国电网应用最为广泛^[16]。

近十年来随着大量典型视在阻抗角判据装置的投运, 实际运行及仿真研究发现其面临特定工况及新型电网结构存在局限性, 多篇文献也曾相应提出过解决方案。文献^[17]指出, 由于长距离特高压

基金项目: 国家电网公司科技项目资助“特大型电网系统级控制保护技术框架研究与设计”(SGBJDK00KJJS900088)

线路衰减时间常数较大, 导致在某些三相短路故障情况下过渡过程相对较长, 易造成视在阻抗角判据在短路过程中误判为失步。对于不对称性的短路故障, 可以通过负序、零序分量来闭锁装置的失步解列判断功能, 而当短路故障为三相对称性故障时, 故障过程中无法使用这些不对称分量进行闭锁, 必须通过振荡和短路的本质特征去区分它们。该文献作者提出, 在典型视在阻抗角失步判据中添加闭锁及解锁条件来提升可靠性: 使用电压突降幅度大、电流中存在较大非周期分量、基波电流有效值轨迹不满足凸函数规律作为闭锁条件; 使用电压突升幅度大、三相电压恢复、失步解列闭锁时间大于后备保护动作时间作为解锁条件。文献[18-19]指出当系统失步较快, 在电磁暂态过渡的过程中即进入失步状态, 在两系统功角差在 0 附近的阶段, 此时无功功率的大小在零轴附近波动, 由于励磁和调速器动态系统的作用以及两端电势幅值变化的影响, 无功功率随机过零摆动时, 视在阻抗角的轨迹可能在 4 个象限的任意位置, 按照典型视在阻抗角判据中阻抗角穿越规律判断, 容易得到错误的振荡周期次数。作者提出通过应用联络线上有功功率过零次数计算振荡周期的方法作辅助判据可避免误判。

上述改进判据实际工程应用中存在一定的局限性: 首先, 增加定值则直接增加装置维护难度, 当振荡周期小或安装位置处于振荡中心时, 电压波动剧烈, 很难确定电压突变幅度定值来严格区分短路与振荡, 而解锁的快慢又取决于事先整定的后备保护动作时间, 后备保护配置复杂, 延时差异较大, 失步判别解锁时间整定值过大影响装置速动性, 整定值过小则易失去可靠性; 其次, 当短路过程中存在有功功率异常倒送时, 以有功功率过零次数计算振荡周期次数是不合理的。此外, 仿真发现经过渡电阻接地, 短路过程中视在阻抗角连续穿越三个区, 在故障切除恢复时回到正常区, 满足视在阻抗角一个异步振荡周期的条件, 也易在恢复期误判为失步。鉴于此, 有必要对视在阻抗角判据进行改进研究。

基于对典型视在阻抗角失步判据理论的深入研究, 本文提出一种新的判据改进思路, 加入振荡过程中电压包络线上沿(最大值)门槛值作为传统视在阻抗角失步判别的解锁条件。在 PSCAD 中搭建模型验证所提改进判据的适应性。

1 视在阻抗角失步判据的基本原理

如图 1 所示的等值两机系统, 两等值机电势分别为 \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 , 为简化分析, 假定两等值电势幅值

相等, 全系统总阻抗为 Z_{eq} 且全系统阻抗角 ϕ_{eq} 相同。振荡中心位置 O 点, 装置安装处 M 点(虚线框内 M 点表示振荡中心位于安装处反方向时的示意), 装置安装处至振荡中心^[20-22]阻抗为 Z_{MO} 。

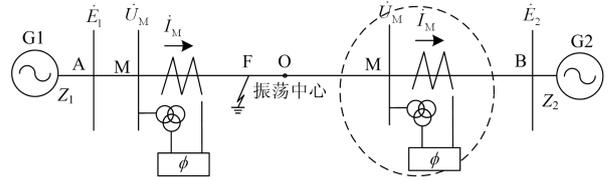


图 1 等值两机系统图

Fig. 1 Equivalent two-machine power system

如图 2 相量图所示, 取电势 \dot{E}_2 为参考矢量, 两系统间的功角差为 δ , 两侧电势与功角的关系为

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2 e^{j\delta} \quad (1)$$

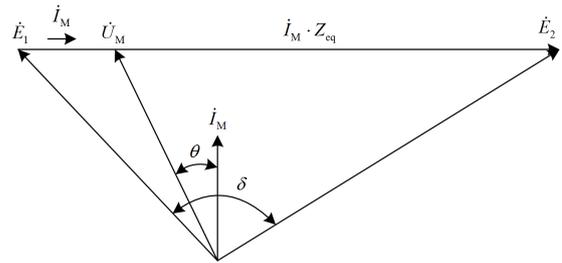


图 2 等值系统相量图

Fig. 2 Phasor diagram of the equivalent system

装置安装处电流为

$$\dot{i}_M = \frac{\dot{E}_2 - \dot{E}_1}{Z_{eq}} = \frac{2\dot{E}_2 \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \cdot e^{j\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\delta}{2} - \phi_{eq}\right)}}{|Z_{eq}|} \quad (2)$$

振荡中心在装置安装位置 M 点正方向时, 装置安装处电压为

$$\dot{U}_M = \dot{E}_1 + \dot{i}_M \left(\frac{Z_{eq}}{2} - Z_{MO} \right) \quad (3)$$

将式(1)代入式(3), 得

$$\dot{U}_M = \left[\left(\frac{1}{2} - \frac{Z_{MO}}{Z_{eq}} \right) + \left(\frac{1}{2} + \frac{Z_{MO}}{Z_{eq}} \right) e^{j\delta} \right] \dot{E}_2 \quad (4)$$

令 $m = \left(\frac{Z_{eq}}{2} + Z_{MO} \right) / \left(\frac{Z_{eq}}{2} - Z_{MO} \right)$ 并整理得

$$\dot{U}_M = \left(\frac{1}{2} + \frac{Z_{MO}}{Z_{eq}} \right) \left[\frac{1}{m} + \cos\delta + j\sin\delta \right] \dot{E}_2 \quad (5)$$

装置安装处视在阻抗角为

$$\theta = \arctan \frac{\sin\delta}{\frac{1}{m} + \cos\delta} - \frac{\pi}{2} - \frac{\delta}{2} + \phi_{eq} \quad (6)$$

因此, 振荡中心位置确定时, 装置安装处 \dot{U}_M 和 \dot{I}_M 的夹角 θ 是功角 δ 的函数, δ 改变时, θ 也随之规律改变, ϕ_{eq} 为常数, 视在阻抗角与功角存在近似关系: $\theta \approx \frac{\delta}{2}$ 。如图 3 所示, 把阻抗角 θ 在 4 象限内划分为 6 个区。

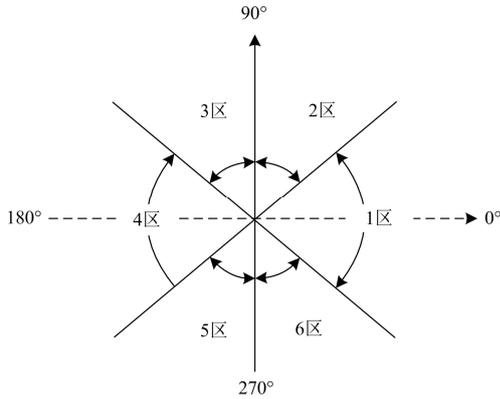


图 3 阻抗角判断区划分

Fig. 3 Divide the judgment area of impedance angle

视在阻抗角判据利用在装置安装处所测量到的阻抗角变化规律, 判断区分系统失步、同步振荡及短路, 表 1 为通过阻抗角穿越规律形成的具体判据。

表 1 视在阻抗角判据

Table 1 Apparent impedance angle criterion

阻抗角规律	判据结论
长期 1 区	正常运行送端
长期 4 区	正常运行受端
顺次经过 1-2-3-4	送端、正方向失步 1 个周期
顺次经过 4-3-2-1	受端、正方向失步 1 个周期
顺次经过 1-6-5-4	送端、反方向失步 1 个周期
顺次经过 4-5-6-1	受端、反方向失步 1 个周期
顺次经过 1-4-1 或 4-1-4	振荡中心附近失步 1 个周期
畸变后驻留在某区	短路故障

2 视在阻抗角失步判据的改进

2.1 视在阻抗角判据改进思路

失步解列装置在系统发生各种故障、转换性故障情况下不应误动作^[23], 因此在短路过程中无论是误判为失步或是的确已进入失步状态, 装置都不应动作。改进判据需要在短路过程中对失步判别进行可靠闭锁, 短路结束后快速解锁。

由式(4)可知, 以 E_2 为参考向量, 两等值系统联络线阻抗值沿线测量电压 \dot{U}_M 的向量运动轨迹如图 4 所示: 线段 AO 上, 振荡中心在测量点的正方向, 测量电压 \dot{U}_M 轨迹为圆心位置在离 AB 轴高

$\left(\frac{1}{2} - \frac{Z_{MO}}{Z_{eq}}\right)|\dot{E}_2|$ 位置处, 半径为 $\left(\frac{1}{2} + \frac{Z_{MO}}{Z_{eq}}\right)|\dot{E}_2|$ 的圆; 线段 OB 上, 振荡中心在测量点的反方向, 测量电压轨迹为圆心位置在离 AB 轴高 $\left(\frac{1}{2} + \frac{Z_{MO}}{Z_{eq}}\right)|\dot{E}_2|$ 位置

处, 半径为 $\left(\frac{1}{2} - \frac{Z_{MO}}{Z_{eq}}\right)|\dot{E}_2|$ 的圆。如图 4 所示, 沿联络线所有位置振荡过程中电压包络线幅值最大值与 E_2 幅值相同; 沿线所有位置安装处振荡过程中电压包络线最小值为 $2Z_{MO}|\dot{E}_2|/Z_{eq}$, 处于振荡中心时 Z_{MO} 为零, 振荡中心电压存在过零点, 典型视在阻抗角判据正是利用这一点来确定安装处与振荡中心的位置关系, 确认装置的保护范围。

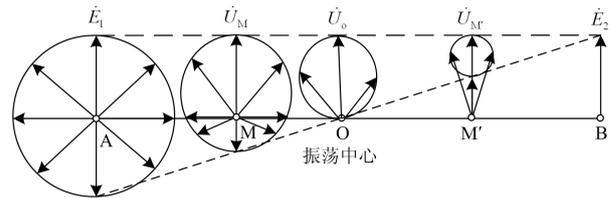


图 4 振荡电压向量轨迹圆图

Fig. 4 Voltage vector trajectory during out-of-step

由式(5)可求得安装处电压的幅值为

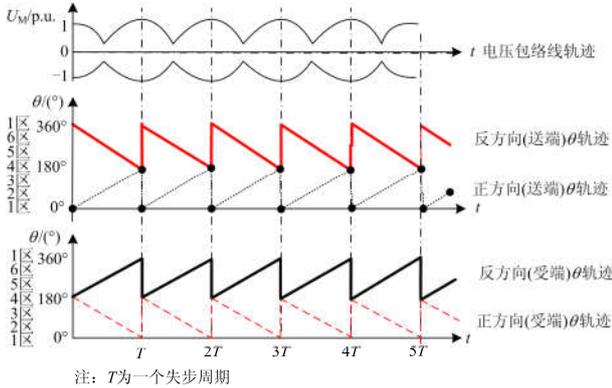
$$|U_M| = |\dot{E}_2| \cdot \sqrt{4\left(\frac{Z_{MO}}{Z_{eq}}\right)^2 + \left(\frac{Z_{eq}^2 - 4Z_{MO}^2}{Z_{eq}}\right)\cos^2(\delta/2)} \quad (7)$$

$Z_{MO} \leq Z_{eq}/2$, 故 $(Z_{eq}^2 - 4Z_{MO}^2) \geq 0$ 。振荡过程中 $\cos^2(\delta/2)$ 最大值为 1, 因此 $\delta=0^\circ$ 或 360° 时, $|U_M|_{\max} = |\dot{E}_2|$ 。振荡过程中 $\cos^2(\delta/2)$ 最小值为 0, 因此 $\delta=180^\circ$ 时, 安装处电压幅值为 $2Z_{MO}|\dot{E}_2|/Z_{eq}$ 。

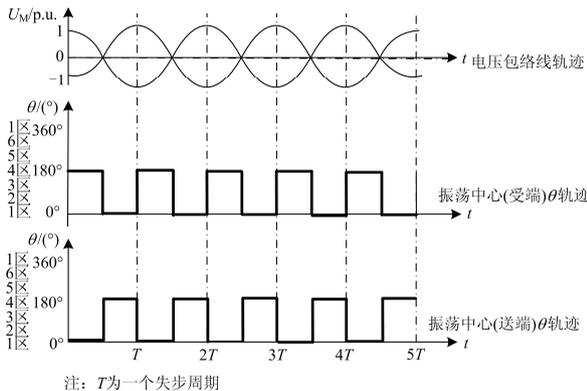
如图 5 所示, 对于确定的安装位置, 在异步振荡时的电压幅值由视在阻抗角(功角)决定。按照安装位置不同对异步振荡分类, 对不同的异步振荡类型, 视在阻抗角在一定区间内变化时电压幅值的包络线单调地递减或递增, 即视在阻抗角在 $\theta=0^\circ(360^\circ)$ 或 180° 附近时测量电压达到最大值。

实际运行时 ϕ_{eq} 初始位置在 1 区或 4 区, 当发生异步振荡时, 对于纯功角失步振荡的情形, 无论装置安装在何处, 总能在视在阻抗角的 1 区或 4 区检测到电压幅值满足接近额定电压大小的包络线最大值。在三相短路过程中, 电压幅值将明显跌落, 即便因为一些特殊的工况或特定的电网, 导致装置判

断出阻抗角穿越了一个失步周期,若此时电压在 1 区和 4 区达不到设定值,则应视该失步周期无效。因此,本文提出在典型视在阻抗角失步判据中,加入振荡过程中电压包络线上沿(最大值)门槛值作为传统视在阻抗角失步判别的解锁条件,可以将短路过程中的失步判断闭锁,短路结束后快速解锁。



(a) 振荡中心位于安装处的正方向或反方向



(b) 位于振荡中心

图 5 电压包络线与视在阻抗角关系图

Fig. 5 Voltage vector trajectory and apparent impedance angle

2.2 视在阻抗角判据改进方案

图 6 所示的视在阻抗角改进逻辑框图,为本文所设计的基于视在阻抗角的失步解列判据改进方法的应用。典型视在阻抗角失步启动判据的启动判据为功率大小或功率方向突变启动,当系统短路故障发生时,装置满足启动条件进入启动状态。装置启动后,改进判据在此处添加一个电压包络线上沿(最大值)门槛值作为解锁判据:装置检测 1 区或 4 区电压幅值 U_M 恢复到失步最大电压幅值设定值 U_{H_s} 时,开放视在阻抗角穿越区间判别。随后按照表 1 所示原则判断视在阻抗角穿越规律是否满足一个振荡周期。当判定周期次数达到到设定值 N_s 且安装处电压包络线最低值 U_{ML} 满足小于设定值时装置动作,其中 U_{L_s} 为包络线电压下沿定值,用来确定保

护范围。

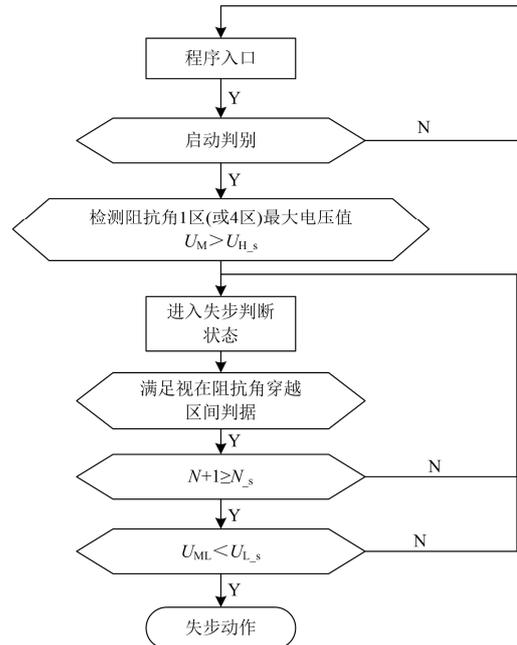


图 6 视在阻抗角判据改进逻辑框图

Fig. 6 Improved logic block diagram of apparent impedance angle criterion

3 仿真实验

3.1 算例说明

为了验证本文所提出的视在阻抗角改进判据的适应性,利用电磁暂态仿真软件(PSCAD-EMTDC)对图 1 所示等值两机系统进行暂态仿真研究。仿真所采用的机组、变压器及线路参数使用 PSCAD 自带模型 Multi-Instance Modules/OOS_Protection 的参数。

为便于对比改进判据效果,在 PSCAD 中搭建解锁模块:视在阻抗角在 1 区或 4 区包络线电压比 U_{H_s} 大时, Z1UHT 或 Z4UHT 输出为 1。搭建典型判据模块,根据表 1 穿越规律判出的失步振荡周期次数输出为 INTG_0。搭建改进判据模块:解锁模块输出为 1 后,判出的失步振荡周期次数输出为 INTG_1。其中 U_{H_s} 设置为 0.8 p.u.。仿真输出电压 (U_M)、电流 (I_M)、有功功率 (P_M)、视在阻抗角 (θ) 的瞬时值及相关监视变量 (INTG_0、INTG_1、Z1UHT、Z4UHT)。

3.2 算例仿真

算例一:双回线运行,稳态运行至 1 s,故障设置在相邻线路, F 点发生三相接地短路故障,开关失灵,故障持续时间设置为 400 ms,短路过程中即发生失步,装置安装在 A 侧 M 点处。仿真数据结

果如图 7 所示。

对于典型失步判据, 1.0 s 发生三相短路故障后, 短路过程中满足两个失步穿越周期。1.39 s 典型失步周期次数 INTG_0 输出结果为 2, 随后按阻抗角穿越规律自动叠加。

对于改进失步判据, 1.0 s 发生三相短路故障后, 短路期间的视在阻抗角 1 区或 4 区电压均小于设定值 0.8 p.u., Z1UHT、Z4UHT 输出为 0, 失步判别闭锁。1.41 s, 1 区包络线电压条件满足, Z1UHT 变位为 1, 开放失步判别。1.59 s 改进失步周期次数 INTG_1 输出结果为 1, 随后按阻抗角穿越规律自动叠加。

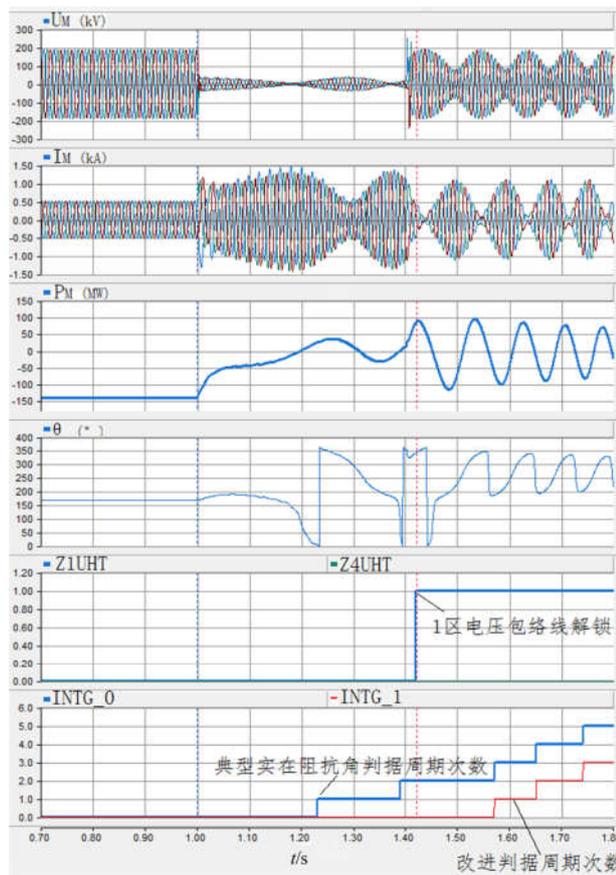


图 7 短路过程中即发生失步的曲线

Fig. 7 Out-of-step curve occurs during short circuit

算例二: 单回线运行, 稳态运行至 1 s, F 点发生三相接地短路故障, 设置接地过渡电阻为 10Ω , 故障持续时间为 150 ms, 短路过程中没有发生失步, 装置安装在 B 侧 M 点处。仿真数据结果如图 8 所示。

对于典型失步判据, 1.0 s 发生三相短路故障后, 短路期间视在阻抗角穿越 50° 到 180° , 满足从 1 区至 4 区的一个失步周期。1.5 s 典型失步周期次数 INTG_0 输出结果为 1, 随后系统恢复稳定, 该数值不变。

对于改进失步判据, 1.0 s 发生三相短路故障后,

短路期间的视在阻抗角 1 区或 4 区电压均小于设定值 0.8 p.u., Z1UHT、Z4UHT 输出为 0, 失步判别闭锁。1.22 s, 4 区包络线电压条件满足, Z4UHT 变位为 1, 开放失步判别。随后系统恢复稳定, INTG_1 输出结果始终为 0。

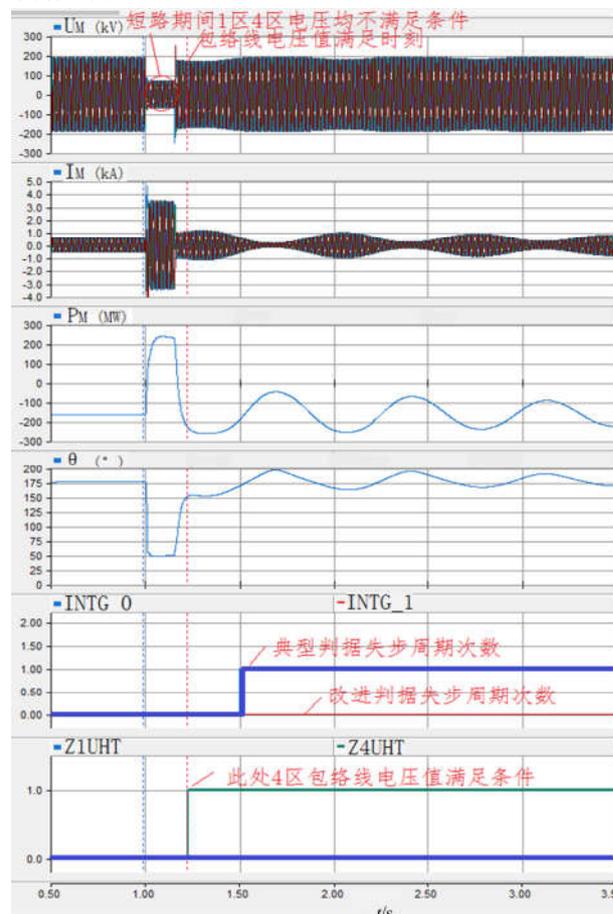


图 8 短路过程中未发生失步曲线

Fig. 8 No out-of-step occurred during short circuit

采用本文所提出的改进判据, 因视在阻抗角 1 区或 4 区电压包络线最大值接近额定电压幅值, 与短路过程中电压幅值有明显差异, 因此工程应用中易于确定闭锁与解锁条件 U_{H_s} 的定值大小。通过文献[17]中的辅助判据, 会增加电压突降幅度、电压突升幅度、后备保护延时三个定值, 当振荡周期较短或处于振荡中心时, 电压波动剧烈, 该定值确定将比较困难, 解锁时间受后备延时整定值束缚, 存在不能及时解锁的现象, 增添运行维护难度。此外, 由图 7、图 8 可见, 上述两个算例在短路过程中均出现潮流反转, 通过文献[18-19]使用的功率过零次数不能区分这类工况。因此本文所提视在阻抗角改进判据可将短路与失步进行有效区分, 在短路过程中对装置进行有效闭锁, 短路结束后快速解锁,

避免装置误判失步周期次数。

4 结语

通过对典型视在阻抗角基本原理的深入分析, 本文提出一种采用电压包络线上沿门槛作解锁条件的判据改进方案, 可以对短路和失步特征进行本质区别, 解决长期以来典型视在阻抗角失步判据存在短路暂态过程中易发生误判的问题, 并利用 PSCAD/EMTDC 搭建仿真模型验证了所提改进方案的有效性。

参考文献

[1] 辛建波, 王玉麟, 舒展, 等. 特高压交直流入对江西电网暂态稳定的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 71-79.
XIN Jianbo, WANG Yulin, SHU Zhan, et al. Transient stability impact analysis of UHV AC/DC access to Jiangxi power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 71-79.

[2] 王超, 常海军, 摆世彬, 等. 高比例新能源与多直流场景下连锁故障防控策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 49-57.
WANG Chao, CHANG Haijun, BAI Shibin, et al. Study on the prevention and control strategy of cascading failure of bulk power system with multi-HVDC and high proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 49-57.

[3] 杜斌, 柳勇军. 溪洛渡直流四极闭锁失稳特性分析及对策研究[J]. 广东电力, 2015, 28(4): 68-71.
DU Bin, LIU Yongjun. Analysis on unstability characteristic of Xiluodu DC quadrupole and research on countermeasures[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(4): 68-71.

[4] 孙黎, 尚教会. 大区域电网动态频率空间分布特性分析[J]. 东北电力大学学报, 2013, 33(3): 38-42.
SUN Li, SHANG Jiaohui. The research of space property of large area power grid dynamic frequency[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2013, 33(3): 38-42.

[5] 张建新. 两渡直流投产后南方电网失步特性及应对措施分析[J]. 广东电力, 2014, 27(4): 61-65.
ZHANG Jianxin. Analysis on out-of-step characteristics of CSG after Xiluodu and Nuozhadu HVDC being put into operation and related countermeasures[J]. Guangdong Electric Power, 2014, 27(4): 61-65.

[6] 肖固城, 唐飞, 廖清芬, 等. 一种可改善失步振荡模式的风电虚拟惯性控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 61-70.
XIAO Gucheng, TANG Fei, LIAO Qingfen, et al. A

virtual inertia control strategy of wind power to improve the out-of-step oscillation modes[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 61-70.

[7] 孙光辉, 吴小辰, 曾勇刚, 等. 电网第三道防线问题分析及失步解列解决方案构想[J]. 南方电网技术, 2008, 2(3): 7-11.
SUN Guanghui, WU Xiaochen, ZENG Yonggang, et al. Analysis on the problems about the third defense line of power systems and the concept of dealing with the separation relay after loss of synchronism[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(3): 7-11.

[8] 张振宇, 王吉利, 柯贤波, 等. 失步振荡中心转移下的多断面暂态稳定协调紧急控制研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(3): 54-59, 103.
ZHANG Zhenyu, WANG Jili, KE Xianbo, et al. Multi-section transient stability coordinated emergency control under the condition of out-of-step oscillation center transfer[J]. Smart Power, 2019, 47(3): 54-59, 103.

[9] 崔杨, 姜姗, 刘青山. 东北地区风电跨区消纳及其经济性分析[J]. 东北电力大学学报, 2013, 33(增刊 1): 89-94.
CUI Yang, JIANG Shan, LIU Qingshan. The feasibility assessment and economic analysis of cross-provincial wind power integration in Northeast China[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2013, 33(S1): 89-94.

[10] 肖世杰. 电网安全稳定控制应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.

[11] 苗田, 郑超, 马世英, 等. 适应主导薄弱断面迁移的暂态稳定控制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 41-48.
MIAO Tian, ZHENG Chao, MA Shiyang, et al. Transient stability control adapting to dominant weak section migration[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 41-48.

[12] 电力系统安全稳定导则: DL 755—2001[S]. 中国: 电力行业电网运行与控制标准化技术委员会, 2001.
Guide on security and stability for power system: DL 755—2001[S]. China: Technical Committee for Standardization of Power Grid Operation and Control in Power Industry, 2001.

[13] 高鹏, 王健全, 甘德强. 电力系统失步解列综述[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 90-96.
GAO Peng, WANG Jianquan, GAN Deqiang. Review on power system out-of-step separation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 90-96.

[14] 黄方能, 周磊, 马骞, 等. 不同失步特征下基于就地信息的失步解列配置方案研究[J]. 智慧电力, 2018,

- 46(11): 105-111.
HUANG Fangngeng, ZHOU Lei, MA Qian, et al. Configuration of out-of-step separation based on local information with different out-of-step characteristics[J]. Smart Power, 2018, 46(11): 105-111.
- [15] 王俊永, 周敏, 周春霞. 快速失步解列装置在特高压电网的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(增刊 2): 1-3.
WANG Junyong, ZHOU Min, ZHOU Chunxia. Application of fast out-of-step separation device in extra high voltage grid[J]. Power System Technology, 2008, 32(S2): 1-3.
- [16] 王英涛, 汤涌, 丁理杰, 等. 新型电力系统失步广域控制技术[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1827-1833.
WANG Yingtao, TANG Yong, DING Lijie, et al. Research and development of new wide area out-of-step control technology for power systems[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1827-1833.
- [17] 任建锋, 丁亚伟, 付磊, 等. 基于相位角原理的特高压电网失步解列改进方案[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(10): 104-107.
REN Jianfeng, DING Yawei, FU Lei, et al. An improved strategy for out-of-step separation based on phase angle principle for 1000 kV ultra-high voltage AC power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(10): 104-107.
- [18] 高鹏, 王建全, 周文平. 视在阻抗角失步解列判据的改进[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(24): 36-40.
GAO Peng, WANG Jianquan, ZHOU Wenping. Improvement of the criterion of apparent impedance angle out-of-step separation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(24): 36-40.
- [19] 陈春节, 杨秀, 顾丹珍. 视在阻抗角失步解列判据的改进研究[J]. 陕西电力, 2013, 41(4): 15-19.
CHEN Chunjie, YANG Xiu, GU Danzhen. Research on the Improvement of the criterion of apparent impedance angle out-of-step separation[J]. Shaanxi Electric Power, 2013, 41(4): 15-19.
- [20] 董希建, 赵杰, 凌超, 等. 基于相位角原理的失步振荡解列判据机理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 1-6.
DONG Xijian, ZHAO Jie, LING Chao, et al. Research on out-of-step oscillation criterion mechanism based on principle of phase angle[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 1-6.
- [21] 吕熹, 丁剑, 杨明玉, 等. 高频切机措施对失步振荡中心迁移的影响[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 124-130.
LÜ Xi, DING Jian, YANG Mingyu, et al. Influence of over-frequency generator-shedding on out-of-step oscillation center migration[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 124-130.
- [22] 刘伟, 高玉喜, 韩连山, 等. 考虑线路电阻情况下的失步振荡中心定位研究[J]. 电力科学与工程, 2018, 34(9): 20-25.
LIU Wei, GAO Yuxi, HAN Lianshan, et al. Study on out-of-step oscillation center position considering line resistance[J]. Electric Power Science and Engineering, 2018, 34(9): 20-25.
- [23] 电力系统失步解列装置通用技术条件: DLT993—2006[S]. 中国: 电力联合会标准化中心, 2006.
General technical requirements for power system out-of-step separation devices: DLT993—2006[S]. China: Power Federation Standardization Center, 2006.

收稿日期: 2019-05-10; 修回日期: 2019-07-15

作者简介:

瞿艳霞(1981—), 女, 硕士, 中级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定控制。E-mail: quyanxia@sf-auto.com

(编辑 魏小丽)