

适用于单测量端的快速解列判据

杨雨昂, 杨立红, 杨明玉, 彭志峰

(华北电力大学(保定)电气与电子工程学院, 河北保定 071003)

Fast Out-of-step Separation Criterion Applied in Single Measurement Side

YANG Yu'ang, YANG Lihong, YANG Mingyu, PENG Zhifeng

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

摘 要: 在现有快速解列判据的基础上, 以减少解列装置的使用量和解列判据的计算量为目的, 提出了适用于单测量端的快速解列判据。分析了等值双机失步振荡系统中, 快速解列判据组相关量在失步联络线功角超前端和滞后端的变化特征, 重点改进这种解列方式的功角变化率判据和有功功率变化率判据, 以解决现有快速解列判据的测量点在线路滞后端无法正确识别失步振荡的问题。BPA 仿真结果证明改进的快速解列判据在线路任何一端都可有效辨别出线路失步情况。

关键词: 快速解列判据; 失步联络线; 滞后端; 功角变化率判据; 有功功率变化率判据

Abstract: Fast out-of-step separation criterion applied in single measurement side is proposed to reduce the application amount of the device and computation amount based on current fast out-of-step separation criterion. The changing characteristics of correlative variables of fast out-of-step separation criterion on leading end and lagging end are studied based on equivalent two-machine out-of-step oscillation system. The power angle and active power criterion for out-of-step mode are improved to solve the problem that the out-of-step oscillation on measuring nodes at lagging end of line cannot be identified correctly by fast out-of-step criteria. An actual power grid model is simulated by using BPA software, and simulation results prove that the line out-of-step can be distinguished by improved fast out-of-step separation criterion in each end of line.

Keywords: fast out-of-step separation criterion; out-of-step connecting line; the lagging end; power angle criterion; active power criterion

0 引 言

目前国际上失步解列研究的发展趋势是研究基于就地信号进行失步判断的新算法和基于同步相量

测量技术的自适应方式。国内目前的失步解列装置除采用传统的失步判别算法例如阻抗继电器法和角度变化法外, 还有根据输电线路功率的变化趋势、线路两端电压相角差的变化趋势以及系统振荡中心的位置等因素预测系统失步的快速解列装置^[1]。

为避免识别联络线路超前、滞后端, 不得不在线路两端均装有快速解列装置。可是设置大量故障导致联络线路失步的仿真结果表明, 在大多数失步状况下均为同一端动作, 而另一端处于闲置状态。

本文就振荡联络线路振荡机理进行分析研究, 对现有快速解列判据相关电气量深入分析后加以改进, 使用改进后的判据只在线路任何一端安装装置就可有效判别联络线失步与否, 从而有效解决装置浪费问题。

1 现有快速解列判据简介

PAC-1000 是中国电科院研制的解列装置, 其在国网 1 000kV 特高压等工程上得到应用, 此失步快速解列装置是由线路有功功率的变化趋势、线路两端电压相角差的变化趋势以及系统振荡中心的位置等因素形成解列判据^[1]。系统由同步运行状态向异步运行状态转移过程中, 线路两侧功角差加速增加, 但线路有功功率不断减少, 当振荡中心进入装置保护范围内且振荡中心的电压低于门槛值时, 装置即发出解列启动信号。解列决策过程如图 1。

决策判据依次为

$$\textcircled{1} 0 < L_{\text{ECS}} = \frac{PR + QX}{(R^2 + X^2)I^2} < 1, \text{ 则振荡中心在}$$

本线路上;

$$\textcircled{2} \frac{d\delta}{dt} > 0, \frac{d^2\delta}{dt^2} > 0, \text{ 则功角变化趋势为加速变大;}$$

$$\textcircled{3} \frac{dp}{dt} < 0, \text{ 则有功的变化趋势为变小;}$$

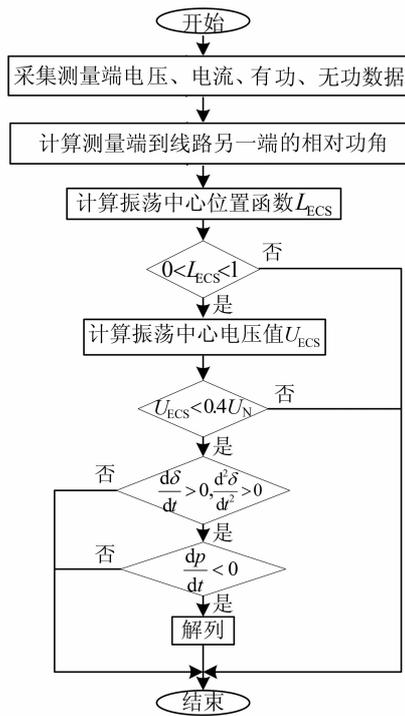


图 1 快速解列决策过程图

$$④ U_{ECS} =$$

$$\sqrt{\left(\frac{PR_{ECS} + QX_{ECS}}{U}\right)^2 + \left(\frac{QR_{ECS} - PX_{ECS}}{U}\right)^2} < U_{SET}, \text{ 则}$$

振荡中心电压小于阈值，阈值一般取 0.4p.u.。

现有快速解列判据较其他判据的优势在于：

①根据联络线两端电气量在失步过程中的几何关系推导了系统失步联络线路振荡中心位置函数： $L_{ECS} = \frac{PR+QX}{(R^2+X^2)I^2}$ ，使在系统第一异步运行周期内，能够实时计算和监视振荡中心漂移规律。并进一步推导得到了振荡中心电压值函数：

$$U_{ECS} = \sqrt{\left(\frac{PR_{ECS} + QX_{ECS}}{U}\right)^2 + \left(\frac{QR_{ECS} - PX_{ECS}}{U}\right)^2} \quad (1)$$

其与振荡中心位置函数相结合应用于识别解列范围，并为后续研究提供电网薄弱点依据。

②在同调机群间功角拉开到 180°之前就可得到合理的判别结果，与普通解列判据需要在系统振荡 2 个及以上失步周期后才能判断失步情况相比，其在第一失步周期内就可消除系统失步振荡。

但是，这种判据由于无法识别超前（滞后）失步端，需要在联络线两端同时判别，解列时只有超前

端满足判据发出解列信号，滞后端形同虚设，考虑到经济性，本文现针对快速解列判据这一点缺陷进行改进，使其在具备解列速度快、具有振荡中心识别能力的同时，兼顾较好的经济性。

2 快速解列判据分析及改进

系统在第一失步周期内，往往形成两个同调机群，而快速解列判据的判别时间也在第一失步周期内，所以现以失步断面所在联络线为重点研究对象，对失步联络线两端同调机群进行等效，如图 2 所示。

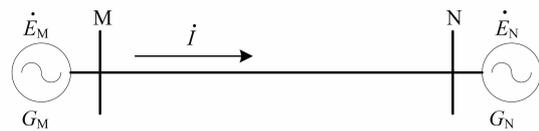


图 2 等值双机系统

假设两个等效同调机群分别为发电机组 G_M 和 G_N ，等值阻抗分别为 Z_M 和 Z_N 。为便于分析，认为系统阻抗角和线路阻抗角相等，失步联络线路全线均匀，全线总阻抗 Z_Σ 恒定不变。

2.1 判据分析

2.1.1 振荡中心及振荡中心电压判据分析

快速解列判据中的振荡中心及其电压判据：

$$0 < L_{ECS} = \frac{MZ}{MN} \left(\frac{NZ}{MN} \right) = \frac{PR + QX}{(R^2 + X^2)I^2} < 1 \quad (2)$$

$$U_{ECS} = \sqrt{\left(\frac{PR + QX}{U}\right)^2 + \left(\frac{QR - PX}{U}\right)^2} < U_{SET} \quad (3)$$

上式(2)、(3)根据下图 3 几何关系以及联络线电气量之间关系推导得到，假设测量点在 M 端，振荡中心位置函数就是 Z 点距 M 端的距离函数，若在测量点在 N 端，振荡中心位置函数则为 Z 点距 N 端的距离函数，振荡中心电压函数同理。

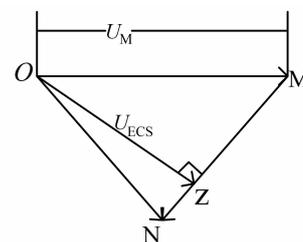


图 3 振荡中心电压示意图

上述分析表明,系统失步期间,无论测量端处于功角超前端还是滞后端,只要振荡中心在测量线路上,计算得到的振荡中心位置和振荡中心电压判别结果是不受测量端的不同而改变的。因此这两判据无需改进。

2.1.2 功角变化率判据分析

根据图2列出的M侧发电机转子运动方程^[2]:

$$\begin{cases} \frac{d\delta_{MN}}{dt} = \omega_M - \omega_N \\ \frac{d^2\delta_{MN}}{dt^2} = \frac{d\omega_M}{dt} \end{cases} \quad (\text{以N侧为参考侧}) \quad (4)$$

假设失步期间 $f_M > f_N$, 则M侧为超前端, N侧为滞后端。由于故障线路切除过晚或线路重载等因素,使得受扰动后的发电机转子加速功率较大,减速阶段无法将其完全抵消掉,从而在第一失步周期内,失步联络线两端的等效机组之间相对功角在从一个很小的值逐渐拉大到 360° 的过程,其值是呈“加速增加→减速增加→加速增加”的失步过程^[3-4]。显然,处于第3阶段时,在失步联络线超前端测量到的 $\frac{d\delta_{MN}}{dt}$ 呈正值递增趋势,而滞后端的 $\frac{d\delta_{NM}}{dt}$ 处于负值递减趋势。同理,超前端 $\frac{d^2\delta_{MN}}{dt^2}$ ($\frac{d\omega_M}{dt}$) 在两次加速过程中数值变化为“正值→零→负值→零→正值”,当出现第2次加速时, $\frac{d\omega_M}{dt}$ 开始大于零,滞后端反之。

因此,故障后系统第一失步周期内,当最低电压点落入联络线MN且最低电压低于规定数值后,如果在超前端测量到的相角差不断增加过程中出现 $\frac{d\omega_M}{dt}$ 由负值转为正值,说明发电机组之间功角差越过了不稳定平衡点,这时就等 $\frac{d\rho_{MN}}{dt} < 0$, 则可以断定系统出现失步,满足所有判据的解列装置将动作解列相关线路;此时滞后端 $\frac{d\omega_N}{dt} < 0$ 不满足判据,有功功率变化率判据也不会进行判别。因此,一旦应用快速解列判据的系统发生振荡,判别结果是只有超前端发出解列信号。

2.1.3 有功功率变化率判据分析

现分析超前端M侧功率特征,假设测量点在母线M附近,以母线流入线路为正方向,根据文献[3],双电源系统振荡时测量点有功功率和无功

功率表达式为

$$p_{MN} = \frac{E_M^2}{Z_\Sigma} \{ [k_c^2 \cos\varphi_{eq} - k_c \cos(\varphi_{eq} + \delta)] - k_{MN}(1 - 2k_c \cos\delta + k_c^2) \cos\varphi_{eq} \} \quad (5)$$

$$q_{MN} = \frac{E_M^2}{Z_\Sigma} \{ [k_c^2 \sin\varphi_{eq} - k_c \sin(\varphi_{eq} + \delta)] - k_{MN}(1 - 2k_c \cos\delta + k_c^2) \sin\varphi_{eq} \} \quad (6)$$

式(5)、(6)中: k_c 为 $\frac{E_M}{E_N}$; φ_{eq} 为线路MN阻抗角; k_{MN} 为测量点电气距离占 L_{MN} 全长的百分比; p_{MN} 和 q_{MN} 为由母线M流向母线N的有功功率和无功功率。

假设线路两端电动势为一恒定比值,测量点所在位置 k_{MN} 固定在母线M附近,根据式(5)取 $\varphi_{eq} = 80^\circ$ 、 $k_c = 1.1$ 、 $k_{MN} = 0.01$, 绘出图4所示在第一失步周期内联络线路MN超前端M随着 δ 不断拉大(由于 δ 角随时间 t 的变化规律为递增,为便于分析,这里将有功功率随 δ 角递增的规律认为与随时间 t 的变化规律一致)的有功功率曲线图。

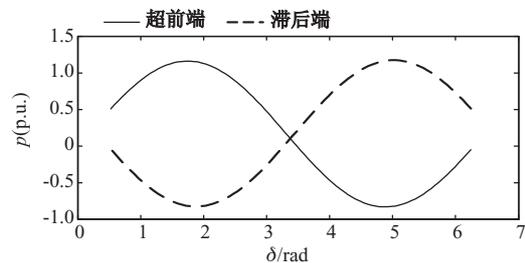


图4 失步联络线路超前、滞后端有功功率

由图4知,随着功角的拉大,超前端的有功功率在功角越过不稳定平衡点后,其值总是会在半个失步周期附近连续不断减小,即 $\frac{d\rho_{MN}}{dt} < 0$ 。而滞后端的有功功率判据明显会得到相反的结论,如图4中所示滞后端有功功率变化趋势曲线。

结合前面分析得到,联络线路MN在第一摆失步期间,只有安装在超前端M侧的快速解列装置能够满足快速解列判据,滞后端N侧测量和计算得到的判据相关结果完全不满足,造成计算量增大一倍和设备严重浪费。

2.2 判据改进

2.2.1 功角变化率判据改进

对功角变化率判据的改进比较容易,在第一个振荡周期内,无论是滞后端还是超前端测量到的相对功角都是在系统电气量越过不稳定平衡点后逐渐

加速拉大，他们的共性是两端功角距离越来越远。这样，可以将两端功角差表达成功角距离差，也就是对原有的功角变化率判据中的相对功角加上绝对值，其物理意义就是失步联络线路两端相对功角距离变化趋势与速度。

判据改进后为

$$\frac{d|\delta|}{dt} > 0, \frac{d^2|\delta|}{dt^2} > 0 \quad (7)$$

式(7)中 $|\delta|$ 为等值机组 G_M 和 G_N 的相对功角的绝对值。结合 2.1 节分析，显然改进后的快速解列功角变化率判据不用区分超前、滞后端，即： $|\delta_{MN}| \approx |\delta_{NM}|$ ，系统振荡中心所在联络线路上无论超前、滞后端都明显满足该判据要求，能够进行下一步有功功率变化率判据判断。

2.2.2 有功功率变化率判据改进

本文根据失步联络线路上上述在第一摆失步期间有功功率变化特点以及文献 [3-4] 提出的无功功率总是由线路超前、滞后端流入振荡中心处的特点，总结各自电气量特点后，发现可以利用 $\varphi = \arctan(q/p)$ 改进判据。将式(6)、(7)有功无功表达式带入 φ 后，如图 5 所示为一个失步振荡周期内 φ 随功角逐渐拉大的变化趋势。

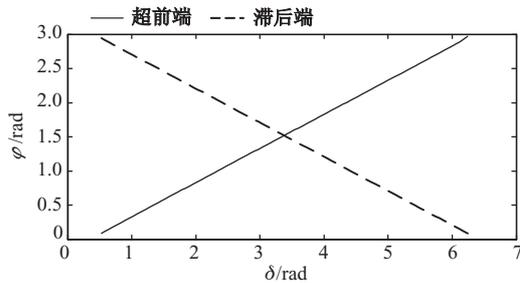


图 5 联络线 MN 送、受端 φ 值

图 5 表明，测量点处于超前端时， φ 值总是持续增大的；处于滞后端时，则不断递减。这样，定义一个因子 A 来使得同一条失步联络线路超前、滞后端有功功率判据结果一致。

$$A = \begin{cases} +1, d(\arctan(q/p))/dt > 0 \\ -1, d(\arctan(q/p))/dt < 0 \end{cases} \quad (8)$$

结合图 5 和式(8)知，当 A 为 1 时，代表在失步联络线路送端处测量得到的结果数据；当 A 为 -1 时，代表在失步联络线路滞后端处测量得到的结果数据。在原有有功功率判据上附上 A 值，

可以很好地辨别失步联络线路超前、滞后端，并且不改变原有判据计算结果值和判据阈值。

将有功功率变化率改进后判据表示为 $A \frac{dp}{dt} <$

0，这样解决了快速解列判据中两个判别联络线路失步与否的核心判据在超前、滞后端结论相反的缺陷，无论在仿真和实际装置运行上，都可以在一条联络线路上只在某一侧安装快速解列装置。

3 算例分析

为了验证快速解列改进后的判据于失步联络线路上应用的有效性，以我国实际电网模型为算例使用 BPA 仿真，设置直流两极闭锁故障：①将可能振荡的联络线路两端设置快速解列措施，确定某一条失步联络线路并确定其动作端(超前端)；②不配备快速解列装置，针对这一条失步联络线路超前、滞后端列出仿真结果以验证第 2 节理论。

图 6 是未改进的功角变化率判据，虚线表示滞后端在 2.05~2.3s 之间(第一振荡周期内解列判别关键阶段)曲线斜率小于零，但若给角度加上绝对值后，在 2.05~2.3s 之间超前、滞后端都是呈一致的递增趋势。即：从图 6 中可以得到的结论是，改进功角变化率判据后失步线路超前、滞后端的功角变化率走势相同，且变化时间非常接近。

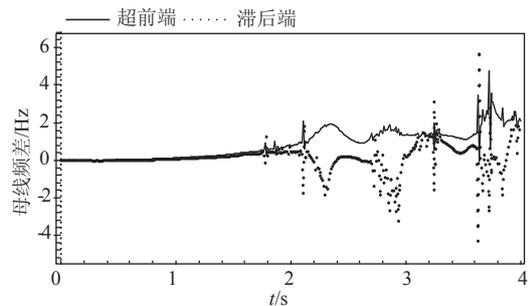


图 6 超前、滞后端母线频差

图 7 表明此失步联络线路超前、滞后端的判据有功功率变化率在第一失步周期内走向相反，滞后端明显不满足判据要求。结合图 7 和图 8 两图：第一失步周期内，超前端有功功率大幅递减过零， φ 值递增表明 $A = 1$ ，满足 $A \frac{dp}{dt} < 0$ ，滞后端有功功率率递增过零， φ 值递减 $A = -1$ ，也满足 $A \frac{dp}{dt} < 0$ 。

表 1 和表 2 为失步断面中某一条联络线超前

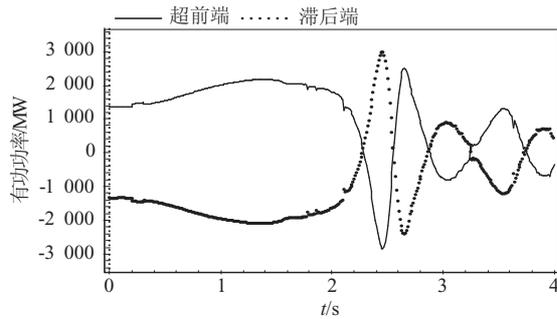


图7 超前、滞后端母线处有功功率

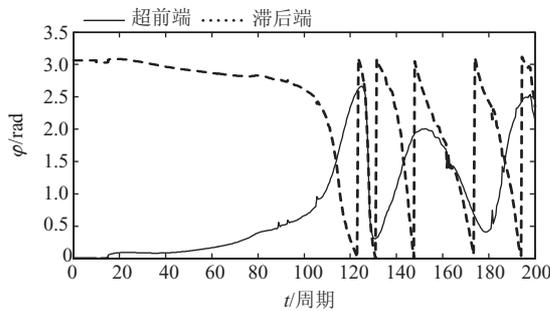


图8 超前、滞后端母线处φ值

(滞后)端改进判据相关值仿真结果。由于振荡中心电压及振荡中心位置判据均无需改进,且解列速度较快,未出现振荡中心漂移现象,在下述时间段内振荡中心位置在距离M侧60%附近波动,且振荡中心电压在下述区间段内小于阈值0.4p.u.,因此此处不再列出振荡中心电压和位置详细结果数据。

表1 失步联络线仿真结果(超前端)

周波	$\frac{d \delta }{dt}$	$\frac{d^2 \delta }{dt^2}$	$\frac{dp}{dt}$	$\frac{d\varphi}{dt}$	A
111	22.375	2.440	-2.36	0.120	1
111.5	23.448	1.852	-2.52	0.126	1
112	24.227	1.264	-2.71	0.131	1
112.5	24.712	0.676	-2.88	0.136	1
113	24.903	0.088	-3.07	0.141	1
113.5	24.800	-0.500	-3.26	0.146	1
114	24.403	-1.088	-3.46	0.149	1

从表1数据可以看出,所研究的失步联络线功角超前端在未实施解列措施情况下,于111~113周波满足功角变化率和频差变化率大于零,113.5周波以后由于频差有所下降,无法满足判据要求;φ值在表1中所示时间段内呈递增趋势,则因子A值为1,从而111~113周波内线路分别满足改进后的功角

表2 失步联络线仿真结果(滞后端)

周波	$\frac{d \delta }{dt}$	$\frac{d^2 \delta }{dt^2}$	$\frac{dp}{dt}$	$\frac{d\varphi}{dt}$	A
111	18.968	2.335	2.40	-0.200	-1
111.5	19.999	1.786	2.56	-0.215	-1
112	20.754	1.237	2.72	-0.231	-1
112.5	21.236	0.688	2.89	-0.248	-1
113	21.442	0.139	3.07	-0.261	-1
113.5	21.375	-0.410	3.25	-0.273	-1
114	21.033	-0.959	3.43	-0.283	-1

和有功变化率判据,即满足式(7)和式(9)。

同理分析表2知,在111~113周波内,滞后端也满足改进快速解列判据。

本例计算结果说明改进后的快速解列判据测量点在失步线路超前端和滞后端均能够正确反映线路失步与否,并能在振荡线路第一失步周期内将其快速解列。

4 结束语

根据本文提出的改进快速解列判据,只需在可能失步的联络线路某一端安装快速解列装置,可极大地节省计算量和设备数目。

参考文献

- [1] 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(2):1-3.
- [2] 李光琦.电力系统暂态分析[M].北京:中国电力出版社,2007.
- [3] 高鹏,王建全,周文平,等.基于无功功率捕捉失步解列断面的研究[J].电力系统及其自动化,2005,29(5):19-24.
- [4] 高鹏,王建全,周文平,等.捕捉失步断面的实现方案及仿真[J].电力系统及其自动化,2005,29(12):38-43.

收稿日期:2013-07-08

作者简介:

杨雨昂(1988-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护,E-mail:66059231@qq.com.

(责任编辑:杨秋霞)