

# 基于功率变化量的电网振荡解列判据与算法研究

丛伟<sup>1</sup>, 潘贞存<sup>1</sup>, 战杰<sup>1</sup>, 孙十柱<sup>2</sup>

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东鲁能积成电子股份有限公司, 山东 济南 250001)

**摘要:** 分析了系统发生振荡时各电气量尤其是有功功率的变化规律, 提出了基于有功功率变化量的电网振荡解列判据。为满足振荡情况下电气量计算的要求, 利用基于瞬时采样值的微机算法进行计算并对该算法进行了验证。仿真结果表明, 该判据不受运行方式和电网结构变化影响, 能可靠检测系统振荡, 判据简单。基于瞬时采样值进行电气量计算的算法简单可靠, 计算量小, 计算速度快。

**关键词:** 有功功率; 变化量; 振荡解列; 瞬时值; 算法

**中图分类号:** TM711; TM727 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)18-0020-04

## 0 引言

电力系统的运行经验表明:即使电网结构合理、运行方式得当,但是在某些严重故障发生后,仍然可能出现系统失稳现象。因此,在我国颁布的《电力系统安全稳定导则》中明确要求:运行中的电力系统必须在适当地点设置解列点,并装设自动解列装置。解列装置是保证电网安全运行的最后一道防线,当电力系统失稳时按照预定的解列方式将电网解列成若干子网,保证电网能够继续运行而不致发生崩溃,它在电力系统中占有十分重要的地位。

近几年来,国内外学者从振荡发生机理和表现特征等方面对系统失步振荡进行了深入的研究<sup>[1]</sup>,提出了若干解列判据并开发了相应的装置。但是目前的一些解列判据还存在诸多问题,主要表现为受系统运行方式和网络结构变化影响较大,判据的灵敏度受装置安装位置影响,靠近振荡中心判据较灵敏,有较高准确性,远离振荡中心灵敏度下降,可能出现误判。因此研究不受系统运行方式和网络结构变化等因素影响的振荡解列判据势在必行<sup>[2,3]</sup>。本文提出了基于有功功率变化量的判据,该判据不受上述因素变化影响,有较好的通用性。同时提出了适合于在系统振荡条件下计算各电气量的微机算法。

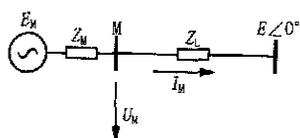


图1 单机无穷大系统等值模型

Fig.1 Equivalent model for single-infinite system

## 1 有功功率变化量判据<sup>[4]</sup>

以典型的单机无穷大系统为例,如图1所示, $Z_M$ 为等值电源的内阻抗, $Z_L$ 为线路阻抗,全系统阻抗为 $Z_\Sigma = Z_M + Z_L$ ,设系统阻抗角相等,等值电源表达式为:

$$\begin{cases} e_M = \sqrt{2} E_M \sin(\omega_1 t + \theta_0) \\ e = \sqrt{2} E \sin(\omega_0 t) \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\omega_1$ 为等值电源的角速度, $\omega_0$ 为工频角速度, $\theta_0$ 为系统初始功角。如果不考虑振荡发生时系统的非线性,则可以使用叠加原理进行电流和电压值的计算。线路中的振荡电流表示为:

$$i_M = \frac{\sqrt{2} E_M}{Z_\Sigma} \sin(\omega_1 t + \theta_0 - \varphi_z) - \frac{\sqrt{2} E}{Z_\Sigma} \sin(\omega_0 t - \varphi_z) \quad (2)$$

其中: $i_M$ 为线路中的振荡电流, $\varphi_z$ 为系统阻抗角。母线M处的电压 $u_M$ 可以表示为:

$$u_M = \frac{Z_L}{Z_\Sigma} \sqrt{2} E_M \sin(\omega_1 t + \theta_0) + \frac{Z_M}{Z_\Sigma} \sqrt{2} E \sin(\omega_0 t) \quad (3)$$

将式(2)和式(3)相乘,可得在M处测量的瞬时功率表达式:

$$p = i \cdot u = \left[ \frac{\sqrt{2} E_M}{Z_\Sigma} \sin(\omega_1 t + \theta_0 - \varphi_z) - \frac{\sqrt{2} E}{Z_\Sigma} \sin(\omega_0 t - \varphi_z) \right] \cdot \left[ \frac{Z_L}{Z_\Sigma} \sqrt{2} E_M \sin(\omega_1 t + \theta_0) + \frac{Z_M}{Z_\Sigma} \sqrt{2} E \sin(\omega_0 t) \right] \quad (4)$$

为简单起见,令 $E_M = E$ ,  $Z_M = kZ_\Sigma$ ,  $\varphi_z = (\omega_1 - \omega_0)t + \theta_0$ ,则式(4)可简化为:

$$p = (k - 1) E I \cos(2\omega_1 t + 2\theta_0 - \varphi_z) - (2k - 1) \cdot E I \cos(\omega_1 t - \varphi_z) + (1 - 2k) E I \cos(\omega_0 t)$$

$$+ \cos(\omega_0 t - \delta) - (1 - k) E I \cos(\omega_0 t + \delta) + k E I \cos(2 \omega_0 t - \delta) \quad (5)$$

对式(5)按照工频周期积分,得到平均功率表达式为:

$$p = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt = \frac{(k-1)EI}{2T} [\sin(2\omega_0 t_2 + 2\omega_0 t_1 - \delta) - \sin(2\omega_0 t_1 + 2\omega_0 t_2 - \delta)] + (1-2k)EI \cos \delta + \frac{kEI}{T(1-\cos \delta)} [\sin(\omega_0 t_2 - \omega_0 t_1 + \delta) - \sin(\omega_0 t_1 - \omega_0 t_2 + \delta)] + \frac{(k-1)EI}{T(1-\cos \delta)} [\sin(\omega_0 t_2 - \omega_0 t_1 + \delta) + \sin(\omega_0 t_1 - \omega_0 t_2 + \delta)] \quad (6)$$

由于 \$\omega\_0 > 0\$, 线路电流 \$i\_M\$、母线电压 \$u\_M\$ 和有功功率 \$P\$ 都不再是稳定值, 它们将随着时间 \$t\$ 周期变化。设 \$\omega\_0 > 0\$, 系统阻抗角 \$\delta = 60^\circ\$, 取电势 \$E\$ 为基准值 1, 等值电源初始功角 \$\delta\_0 = 40^\circ; k = 0.3\$, 各电气量的变化情况如图 2 所示。

振荡电流大小与测量点位置无关, 即在振荡线路的任何测点测得的振荡电流大小都是一样的。振荡电流的幅值最大等于系统末端发生三相短路时的短路电流, 最小约为零; 振荡电压与测量点位置有关, 振荡最剧烈的地方在振荡中心, 最大幅值等于两端等值电势之和, 最小为零。越远离振荡中心, 电压幅值变化越小。有功功率幅值也是时间的函数, 系统振荡时有功潮流将在正常运行值附近做周期性振荡。振荡发生时有功功率由正常运行值开始变大, 到 \$1/4\$ 振荡周期附近达到峰值, 然后开始变小, 到 \$3/4\$ 振荡周期附近达到谷值。故提出基于有功功率变化量的电网振荡解列判据如下:

1) 利用突变量如 \$I\$ (电流变化量)、\$P\$ (功率变化量)、或 \$df/dt\$ (频率变化率) 作为启动信号, 开始进行失步振荡检测。

2) 用比较法找到有功功率的峰值并记为 \$P\_S\$,

同理找到有功功率的谷值并记为 \$P\_L\$。\$P\_L\$ 值应考虑功率方向问题。

3) 设由振荡导致的有功功率幅值变化量为 \$P\$, 则

$$P = P_S - P_L \quad (7)$$

4) 设功率振荡的最大门槛值为 \$P\_{set}\$, 当 \$P > P\_{set}\$ 时, 振荡计数器加 1。\$P\_{set}\$ 可参考系统的稳定裕度和线路传输极限功率等参数而设定。

5) 如果振荡计数器的值大于设定的最大值 \$N\$, 意味着系统发生了比较严重的振荡, 需要及时解列。

根据实际电流系统的运行经验, 振荡周期一般不超过 3 s。所以可假设在 10 s 内如果 \$N\$ 的值不超过 4, 则认为系统恢复稳定, 振荡计数器清零复位。

## 2 基于瞬时采样值的电气量微机算法

系统振荡时各电气量的频率将不再是工频。但是基于傅氏算法计算电气量是在工频周期下进行的, 需要的数据窗长度最小为一个周期。这样在系统发生振荡时, 其计算精度和计算速度满足不了要求。本文利用基于瞬时采样值快速计算电气量的方法<sup>[5]</sup>, 该方法的最大的特点是计算过程与信号频率无关, 因此尤其适合在系统振荡时计算各电气量。

由电工学的知识可知, 在对称的三相系统中, 有以下关系式成立:

$$I = \frac{2}{3} \sqrt{i_a^2 + i_b^2 + i_c^2 - i_a i_b - i_b i_c - i_c i_a} \quad (8)$$

$$U = \frac{2}{3} \sqrt{u_a^2 + u_b^2 + u_c^2 - u_a u_b - u_b u_c - u_c u_a} \quad (9)$$

$$P = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad (10)$$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} [u_a (i_c - i_b) + u_b (i_a - i_c) + u_c (i_b - i_a)] \quad (11)$$

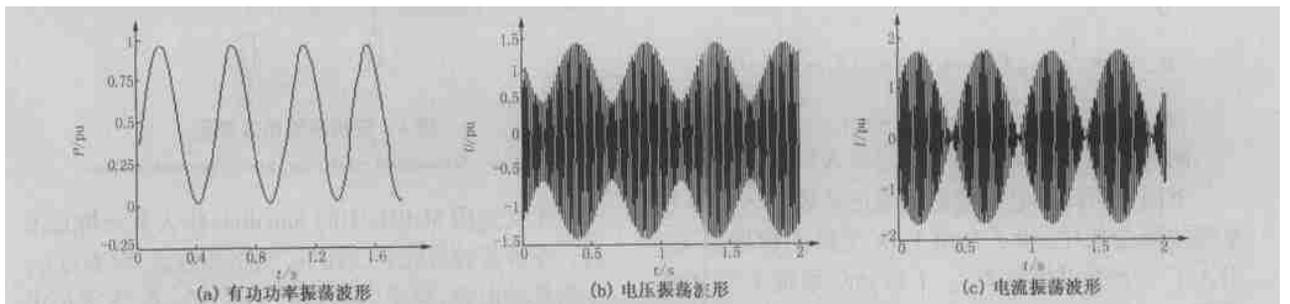


图 2 系统振荡时各电气量变化规律

Fig. 2 Changing rules for various electrical quantities in system oscillation

下面我们利用 Park 变换来证明上述等式对于非工频信号也成立<sup>[6]</sup>。

Park 变换一般表达形式为：

$$i_{dq0} = R i_{abc} \quad (12)$$

R 为 Park 变换矩阵,表达式为：

$$R = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos & \cos(-120^\circ) & \cos(+120^\circ) \\ -\sin & -\sin(-120^\circ) & -\sin(+120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中： $\theta = \omega t + \theta_0$  为 d 轴和 a 轴之间的夹角， $\theta_0$  为  $t = 0$  时 d 轴和 a 轴的夹角。

Park 变换为我们提供了将交流量变换为直流量的途径,而在直流系统中,由于不存在频率这一概念,有功功率的计算十分简单。

同理有 Park 反变换,一般表达式为：

$$i_{abc} = R^{-1} i_{dq0} \quad (14)$$

$R^{-1}$  为 Park 反变换矩阵,表达式为：

$$R^{-1} = \begin{bmatrix} \cos & -\sin & 1 \\ \cos(-120^\circ) & -\sin(-120^\circ) & 1 \\ \cos(+120^\circ) & -\sin(+120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

如果三相系统对称,  $i_a + i_b + i_c = 0$ , 则平均有功功率的表达式为：

$$P = \frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q) \quad (16)$$

由式(12)、(13)可得：

$$\begin{cases} i_d = \frac{2}{3} [i_a \cos \theta + i_b \cos(\theta - 120^\circ) + i_c \cos(\theta + 120^\circ)] \\ i_q = \frac{2}{3} [-i_a \sin \theta - i_b \sin(\theta - 120^\circ) - i_c \sin(\theta + 120^\circ)] \end{cases} \quad (17)$$

将式(17)代入式(16),并整理得：

$$P = \frac{1}{3} [i_a (u_{ab} - u_{ca}) + i_b (u_{bc} - u_{ab}) + i_c (u_{ca} - u_{bc})] = \frac{1}{3} [u_{ab} (i_a - i_b) + u_{bc} (i_b - i_c) + u_{ca} (i_c - i_a)] = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad (18)$$

同理可以证明无功功率的表达式(11)成立。

下面证明计算电流幅值的表达式成立。在电力系统故障分析中,为了介绍 Park 变换的物理意义,引入了一个通用相量  $I$ <sup>[7]</sup>。 $I$  在 dq0 系统中经分解得到：

$$\begin{cases} i_d = I \cos(\theta - \alpha) \\ i_q = -I \sin(\theta - \alpha) \end{cases} \quad (19)$$

是 d 轴和 a 轴之间的夹角， $\alpha$  为 a 轴和通用

相量  $I$  之间的夹角，

$$I = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (20)$$

如图 3 所示,  $I$  在数值上等于 abc 系统中相电压的最大模值。把式(17)带入式(20)并整理得：

$$I = \frac{2}{3} \sqrt{i_a^2 + i_b^2 + i_c^2 - i_a i_b - i_b i_c - i_c i_a} \quad (21)$$

同理可以证明得到 abc 三相系统电压幅值的计算表达式。

由式(11)、(18)、(21)可以得到系统阻抗表达式：

$$\begin{cases} R = P / I^2 \\ X = Q / I^2 \end{cases} \quad (22)$$

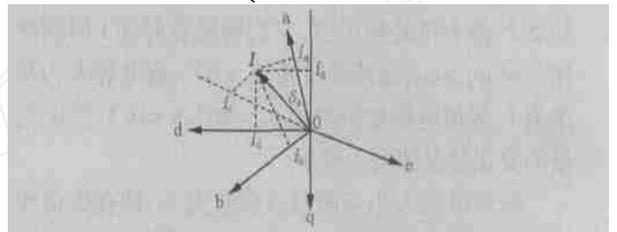


图 3 通用相量在 d、q 轴上的分解  
Fig. 3 Decomposition of universal phasor in axis d and q

式(8)、(9)、(10)、(11)表明,在对称的三相系统中,可以通过瞬时值直接计算相应电气量的幅值。在微机保护算法中,只需任意时刻  $k$  的电流、电压采样值,就可以得到相关幅值和平均值。它不受信号频率的影响,数据窗长度为 1,便于快速计算,尤其适合系统振荡频率不断变化情况下电气量的计算。

### 3 仿真计算

仿真系统模型来自于 IEEE 标准 5 节点系统模型的简化,如图 4 所示。

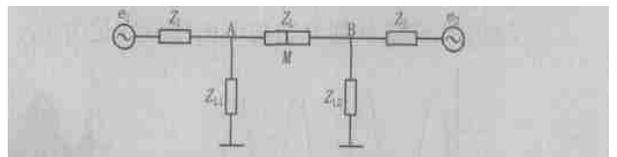


图 4 双机系统仿真模型  
Fig. 4 Simulation mode for dual-generator system

本文选用 Matlab 中的 Simulink 作为系统仿真工具。在参数的选取上,假定  $e_1$  为送端电源,频率为  $f_1$ ,  $e_2$  为受端电源,频率为  $f_2$ ,且  $f_1 > f_2$ ,  $Z_1$ 、 $Z_2$  为等值电源内阻抗,  $Z_L$  为线路阻抗,  $Z_{L1}$ 、 $Z_{L2}$  为等值负荷阻抗。测量电位于  $M$  处,  $Z_{AM} = k \cdot Z_L$  ( $0 < k < 1$ )。

由图 5 可以看出,系统振荡时有功功率的幅值发生较大的波动,基于瞬时值计算的有功功率能很好地

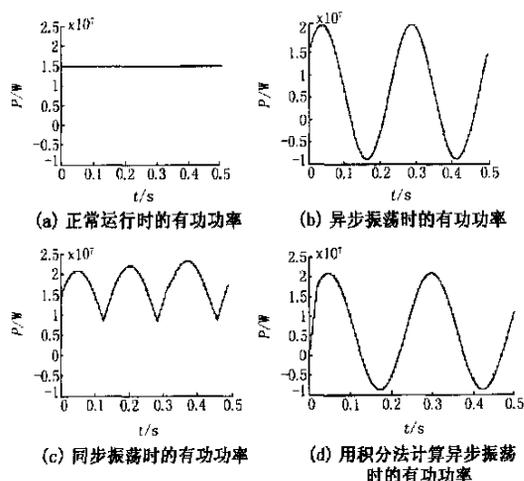


图5 Matlab 仿真有功功率波形

Fig. 5 Simulation waveforms of active power by Matlab

跟踪系统振荡时潮流的变化特征,如图5(b)所示。振荡时功率最大幅值约为 $21\text{ MW}$ ,最小约为 $-9\text{ MW}$ ,振幅大约在 $30\text{ MW}$ 左右,如果正常运行时传输的有功功率值在 $15\text{ MW}$ 左右(如图5(a)所示),由振荡引起的有功功率变化为正常幅值的2倍。图5(c)为发生同步振荡时有功功率变化轨迹图,这是仿真最不利情况下的同步振荡,此时有功功率的振幅在 $\pm 0.5\text{ MW}$ 左右,实际的同步振荡会远小于这个比例。图5(d)为利用积分法求得的有功功率波形,因为需要至少一个周期的采样值才能得到计算结果,故在开始的第一个周期和最后的一个周期计算值误差较大。计算误差的大小取决于实际系统频率偏离工频的程度,偏离的程度越大,计算误差也越大。

本文提出的判据没有对失步振荡和同步振荡进行严格的区分,因为某些系统联系较弱,如果由于同步振荡导致传输的有功功率变化较大,超出了系统的稳定裕度,同样需要进行解列操作。

#### 4 结论

基于有功功率变化量的电网振荡解列判据不受系统运行方式、电网结构变化、潮流方向改变等因素影响,只与系统正常运行时传输的功率及其抗扰动能力有关,它能根据振荡的强弱程度判断是否需要解列操作,更符合电力系统运行的要求。基于瞬时采样值进行电气量计算的算法尤其适合发生振荡的系统的电气量计算,它不受信号频率变化的影响,且数据窗的长度仅为1,能实时跟踪频率变化时

各电气量的变化。仿真计算表明,基于有功功率变化量的电网振荡解列判据能可靠检测系统振荡,判据简单,动作可靠。基于瞬时采样值进行电气量计算的算法简单可靠,计算量小,计算速度快,为非工频电气量幅值的计算提供了便捷有效的处理手段。

#### 参考文献:

- [1] 邵俊松,李庚银,周明(SHAO Jun-song, LI Geng-yin, ZHOU Ming). 电力系统低频振荡分析及振荡解列策略研究(Analysis of Power System Low Frequency Oscillation and the Study of Separation Strategy)[J]. 电力情报(Information on Electric Power), 2000, (2): 1-5.
- [2] 陶先文(TAO Xian-wen). 南方互联电网自动解列装置分析(Analysis of Automatic Separation Devices in South China Interconnected Power Grid)[J]. 电网技术(Power System Technology), 1996, 20(1): 33-37.
- [3] 张毅刚,张保会(ZHANG Yi-gang, ZHANG Bao-hui). 大型发电机组失步预测及保护综述(Summary of Forecast of Out-of-step and Protections for Large Scale Generators)[J]. 继电器(Relay), 1999, 27(4): 1-5.
- [4] CONG Wei, PAN Zhen-cun, YUN Zhi-hao, et al. The Method of Detecting Asynchronous Power Swing Based on the Variation of Active Power[A]. IEE 5th International Conference (PSMC), 2002. 297-302.
- [5] 林涛,尹项根,陈德树(LIN Tao, YIN Xiang-gen, CHEN De-shu). 瞬时电量采样值一点算法及在微机保护中的应用(Algorithm for Instantaneous Electrical Quantities and Its Application in the Microcomputer-based Protection System)[J]. 华中理工大学学报(Journal of Huazhong University of Science and Technology), 1997, 25(2): 47-48.
- [6] 李光琦(LI Guang-qi). 电力系统暂态分析(Transient Analysis of Power System)[M]. 北京:中国电力出版社(Beijing:China Electric Power Press), 1998.
- [7] 刘万顺(LIU Wan-shun). 电力系统故障分析(Fault Analysis of Power System)[M]. 北京:中国电力出版社(Beijing:China Electric Power Press), 1998.

收稿日期: 2004-01-07; 修回日期: 2004-05-10

作者简介:

丛伟(1978-),男,博士研究生,研究方向为电力系统继电保护和紧急控制; E-mail: weicong@mail.sdu.edu.cn

潘贞存(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统继电保护和自动控制方面的教学和科研工作;

战杰(1981-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护和多媒体技术。

(下转第28页 continued on page 28)

## 参考文献:

- [1] 李景禄,林玉怀,陈忠仁,等(LI Jing-lu, LIN Yu-huai, CHEN Zhong-ren, et al). ZXB 系列自动跟踪补偿消弧装置(ZXB Series Arc Suppression Device with Automatic Following and Compensation) [J]. 中国电力(Electric Power), 1998, 31(8): 42-44.
- [2] 李福寿(LI Fu-shou). 中性点非有效接地电网的运行(Operation of Electric Power System with Neutral Ineffective Grounding) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1993.
- [3] 李景禄(LI Jing-lu). 自动跟踪补偿消弧装置的并联运行(Parallel Operation of Automatic Tracking Compensation Arc-suppression Apparatus) [J]. 供用电(Power Supply and Use), 1998, 15(4): 25-28.
- [4] 吴运祥,吕军梅,孙月琴(WU Yun-xiang, LÜ Jun-mei, SUN Yue-qin). 增大电流互感器变比与减小电流互感器二次负担(Increasing the Change Rate of CT and Decrease the Secondary Load of CT) [J]. 继电器(Relay), 1999, 27(3): 52-55.
- [5] 李景禄,刘春生,胡毅,等(LI Jing-lu, LIU Chun-sheng, HU Yi, et al). 配电网自动跟踪补偿消弧装置(Automatic Tracking Compensation Arc-suppression Apparatus Used for Distribution Net) [J]. 变压器(Transformer), 2000, 37(10): 33-37.

收稿日期: 2004-01-03

作者简介:

陈忠仁(1972-),男,硕士,工程师,研究方向为配电网自动化及智能仪器设计; E-mail: chenchen0520@sohu.com

吴维宁(1964-),男,教授级高工,所长,研究方向为电力系统监控;

陈家宏(1960-),男,教授级高工,研究方向为电力系统监控。

### Study of measuring and tracing of arc-suppression coil with automatic tuning

CHEN Zhong-ren<sup>1,2</sup>, WU Wei-ning<sup>2</sup>, CHEN Jia-hong<sup>2</sup>, DONG Hao-bin<sup>1</sup>

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Wuhan High-voltage Research Institute, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Precisely measuring and tracing is a precondition and basis of arc-suppression coil with automatic tuning accurately compensating system capacitive current and efficiently quenching ground arc. Based on the simulation test and practical experience, this paper analyzes several problems of affecting measurement in detail, and presents the correcting formulas and countermeasures. In the end, the accuracy and sensitivity of tracing are discussed.

**Key words:** arc-suppression coil; measuring; tracing; neutral-to-ground voltage; out-of-resonance tuning

(上接第 23 页 continued from page 23)

### Study of power system splitting criterion based on the variation of active power and its algorithm

CONG Wei<sup>1</sup>, PAN Zhen-cun<sup>1</sup>, ZHAN Jie<sup>1</sup>, SUN Shi-zhu<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Shandong Luneng Jicheng Electronic Co., Ltd, Jinan 250001, China)

**Abstract:** The changing characteristics of electrical quantities especially the active power in system oscillation conditions are analyzed. Power system splitting criterion based on the variation of active power is proposed. A new microprocessor algorithm, which based on instantaneous sampling values, is developed and tested to meet the calculation requirement when system oscillation occurs. The simulation results show that this splitting criterion is independent of power system operation mode and grid structure, and can detect system oscillation reliably. The proposed microprocessor algorithm is fast, simple and reliable.

**Key words:** active power; variation; oscillation and splitting; instantaneous value; algorithm