

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2014 年 4 月 24 日 (24.04.2014)



(10) 国际公布号
WO 2014/059870 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01R 31/00 (2006.01) H02J 3/24 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2013/084402
- (22) 国际申请日: 2013 年 9 月 27 日 (27.09.2013)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201210397698.6 2012 年 10 月 18 日 (18.10.2012) CN
- (71) 申请人: 国家电网公司 (STATE GRID CORPORATION OF CHINA) [CN/CN]; 中国北京市西城区西长安街 86 号, Beijing 100031 (CN)。 中国电力科学研究院 (CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE) [CN/CN]; 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。
- (72) 发明人: 刘增煌 (LIU, Zenghuang); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 李莹 (LI, Ying); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 李文锋 (LI, Wenfeng); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 陶向宇 (TAO, Xiangyu); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 王官

宏 (WANG, Guanhong); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 何凤军 (HE, Fengjun); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 朱方 (ZHU, Fang); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。

(74) 代理人: 北京安博达知识产权代理有限公司 (AM-BOYNA INTELLECTUAL PROPERTY AGENT CO.,LTD.); 中国北京市海淀区大钟寺 13 号院 1 号楼华杰大厦 B215, Beijing 100098 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ,

[见续页]

(54) Title: METHOD FOR DETERMINING NEGATIVELY-DAMPED OSCILLATION AND FORCED OSCILLATION BASED ON STRAIGHT LINE METHOD

(54) 发明名称: 基于直线法判别负阻尼振荡与强迫振荡的方法

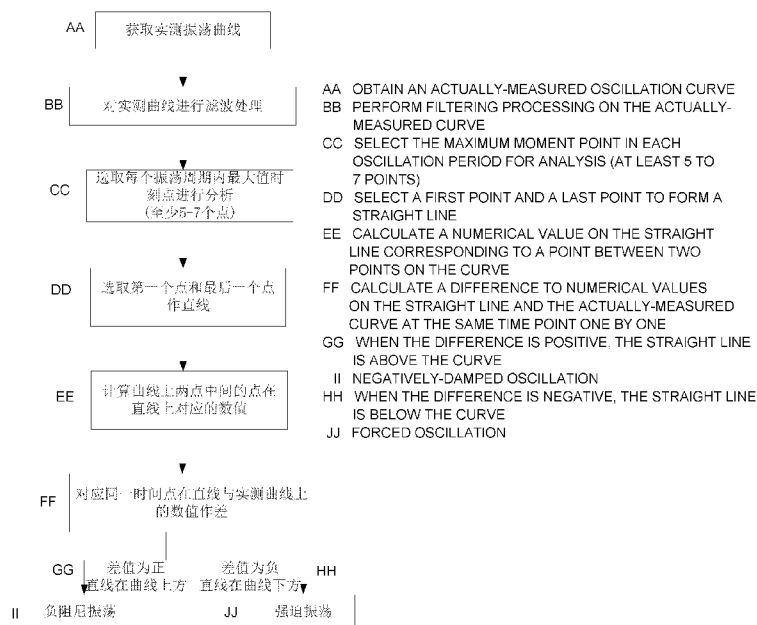


图1 / FIG. 1

(57) Abstract: Provided is a method for determining negatively-damped oscillation and forced oscillation based on a straight line method. The method comprises: (1) obtaining an actually-measured oscillation curve; (2) selecting the maximum moment point in each oscillation period for analysis; (3) confirming the oscillation as increasing oscillation; (4) selecting two points, the spacing of which is greater than four oscillation periods, to form a linear equation; and (5) calculating a difference to numerical values on the straight line and the actually-measured curve at the same time point one by one, and determining the type of oscillation according to the obtained result. According to the method for determining negatively-damped oscillation and forced oscillation based on the straight line method, based on the data of a PMU or a WAMS, that certain low-frequency oscillation is of low-frequency negatively-damped oscillation caused due to damp lack of the system, or the forced oscillation caused due to a forced disturbance source existing in the system can be determined rapidly in first tens of period waves so as to fast take measures to restrain the low-frequency oscillation.

(57) 摘要:

[见续页]



BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

提供了一种基于直线法判别负阻尼振荡与强迫振荡的方法, 包括: (1) 获取实测振荡曲线; (2) 选取每个振荡周期内最大值时刻点进行分析; (3) 确认振荡为增幅振荡; (4) 选取间隔大于 4 个振荡周期的两点形成直线方程; (5) 对同一时间点在直线与实测曲线上的数值逐一作差, 根据得到的结果对振荡类型进行判断。该基于直线法判别负阻尼振荡与强迫振荡的方法, 能够通过 PMU 或 WAMS 的数据, 在初始十几个周波内快速识别出某个低频振荡是由于系统缺乏阻尼而导致的负阻尼低频振荡, 还是由于系统中存在强迫扰动源引发的强迫振荡, 以便快速采取抑制低频振荡的措施。

基于直线法判别负阻尼振荡与强迫振荡的方法

技术领域

本发明属于电力系统领域，具体涉及一种基于直线法判别负阻尼振荡与强迫振荡的方法。

背景技术

随着电力工业市场化进程的深入，电力系统越来越趋于极限运行，低频振荡问题是国内外电网共同面对的技术难题。低频振荡频率低，振荡范围广，振荡持续时间长，对电网安全稳定造成了巨大威胁。产生低频振荡的原因主要有两种，一种是负阻尼低频振荡，负阻尼振荡是逐渐增幅过程，若没有人为干预，将持续保持增幅振荡，振荡的幅度越来越大，直到系统切机或失稳；另一种是强迫共振型的低频振荡，当扰动频率与系统自然振荡频率相同或接近时，产生共振，振荡振幅主要与扰动的幅度及系统阻尼水平有关，振荡过程中扰动源一直存在。两种机理振荡的起因不同，需要采取的应对措施也不同，因此有效地判别负阻尼振荡和强迫振荡对快速应对低频振荡问题有重要意义。但由于两种振荡的表现形式很相似，目前尚未发现有能有效判别负阻尼振荡和强迫振荡方法的报道。

发明内容

为克服上述缺陷，本发明提供了一种基于直线法判别负阻尼振荡与强迫振荡的方法，能够通过 PMU 或 WAMS 的数据，在初始十几个周波内快速识别出某个低频振荡是由于系统缺乏阻尼而导致的负阻尼低频振荡、还是由于系统中存在强迫扰动源引发的强迫振荡，以便快速采取抑制低频振荡的措施。

为实现上述目的，本发明提供一种基于直线法判别负阻尼振荡与强迫振荡的方法，其改进之处在于，所述方法包括如下步骤：

(1).获取实测振荡曲线；

- (2).选取每个振荡周期内最大值时刻点进行分析;
- (3).确认振荡为增幅振荡;
- (4).选取间隔大于 4 个振荡周期的两点形成直线方程;
- (5).对同一时间点在直线与实测曲线上的数值逐一作差, 根据得到的结果对振荡类型进行判断。

本发明提供的优选技术方案中, 在所述步骤 1 中, 通过 PMU 或 WAMS 的数据获取实测振荡曲线, 对实测振荡曲线进行处理, 得到主导振荡模式的正弦信号。

本发明提供的第二优选技术方案中, 所述实测振荡曲线包括: 枢纽点、变电站母线的频率信号、联络线和发电机机端的有功功率信号曲线。

本发明提供的第三优选技术方案中, 在所述步骤 2 中, 选取的最大值时刻点为 5-7 个。

本发明提供的第四优选技术方案中, 在所述步骤 5 中, 比较直线方程时间段内各点的测量值与直线上之值的关系来辨别振荡性质, 比较直线方程时间段外若干点的测量值与直线上之值的关系来再次确认振荡性质辨别结果的正确性。

本发明提供的第五优选技术方案中, 振荡曲线表示为:
 $x = B \sin(\omega t) - B e^{\alpha t} \sin(\omega t)$, 设 $t = t_i$ 时, 有 $x = x(t_i)$ 为振荡曲线 x 的上包络线上的一个极大值; (B 是振荡幅值; α 是衰减系数, 它表征的是该模式的包络线衰减的快慢; ω 是振荡的角频率。)

则当 $\alpha > 0$ 时, $t_i = \frac{k \cdot 2\pi + 1.5\pi}{\omega}$, 当 $\alpha < 0$ 时, $t_i = \frac{k \cdot 2\pi + 0.5\pi}{\omega}$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$, 曲线 x 达到每个振荡周期内的最大值 $x(t_i)$; 选取包络线上的两个时间点 t_N 和 t_M ,

$t_M = t_N + (M - N)T$ ，通过这两个点可以确定一条直线

$F(t_k) = x(t_N) + \frac{x(t_M) - x(t_N)}{t_M - t_N}(t_k - t_N)$ ，其中， $M - N > 2$ ， T 为振荡周期；

对于任意 $t_k = t_N + (k - N)T$ ，有实际测量值 $x(t_k)$ 和直线公式确定的计算值

$F(t_k) = x(t_N) + \frac{x(t_M) - x(t_N)}{t_M - t_N}(t_k - t_N)$ ，两者之差为：

$$\Delta x(t_k) = F(t_k) - x(t_k) = x(t_N) + \frac{x(t_M) - x(t_N)}{t_M - t_N}(t_k - t_N) - x(t_k)$$

式中： $F(t_k)$ 表示 t_k 时刻对应直线上的数值；

$x(t_k)$ 表示 t_k 时刻对应振荡曲线上的数值。

(1).当 $\alpha > 0$ （系统阻尼为负）且 $t_N < t_k < t_M$ 时，必有 $F(t_k) - x(t_k) > 0$ ；当 $\alpha > 0$ 且 $t_M < t_k$ 时，必有 $F(t_k) - x(t_k) < 0$ ；

(2).当 $\alpha < 0$ （系统阻尼为正）且 $t_N < t_k < t_M$ 时，必有 $F(t_k) - x(t_k) < 0$ ；当 $\alpha < 0$ 且 $t_M < t_k$ 时，必有 $F(t_k) - x(t_k) > 0$ ；

其中， B 是振荡幅值； α 是衰减系数； ω 是振荡的角频率。

本发明提供的第六优选技术方案中，差值为正则振荡曲线模式为负阻尼振荡；否则振荡曲线模式为强迫振荡。

与现有技术比，本发明提供一种基于直线法判别负阻尼振荡与强迫振荡的方法，在发生低频振荡的增幅的最初几个或十几个周波内，采用枢纽点、变电站母线的频率信号或者联络线、发电机机端的有功功率信号曲线，选取 5-7 个振荡周期内最大值时刻点，可快速识别出低频振荡的性质是负阻尼振荡还是强迫振荡；这样就解决了在发生低频增幅振荡时振荡性质难以识别的问题，可以有针对性的采取措施抑制振荡；而且，此方法可以不依赖于波形的滤波处理，便于实施、准确度高，通过 PMU 或 WAMS 的信号快速识别出对于某个低频振荡是由于系统缺乏阻尼而导致的负阻尼低频振荡，还是由于系统中存在强迫扰动

源引发的强迫振荡，以便快速采取抑制低频振荡的措施。

附图说明

图 1 为基于直线法判别负阻尼振荡与强迫振荡的方法的流程图。

图 2 为负阻尼低频振荡的振荡曲线及采用判据的判别结果示意图。

图 3 为强迫振荡的振荡曲线及采用判据的判别结果示意图。

具体实施方式

本发明解决其技术问题所采用的技术方案具体包括如下几个部分：

(1) 低频振荡过程中的电气量特征

电力系统中发生低频振荡时，发电机的转子角，转速，以及相关的电气量，如线路功率、母线电压等都会发生近似等幅或增幅的振荡，其振荡频率较低，一般在 0.1-2.5Hz 左右。

设角频率为 ω_d 的振荡模式为电力系统中的一个负阻尼(或弱阻尼)振荡模式。在电力系统遭受扰动后的响应由强迫(稳态)分量 $x = x_0$ 和自由分量 $A_0 e^{\alpha t} \sin(\omega_d t + \varphi_0)$ 组成

$$x = x_0 + A_0 e^{\alpha t} \sin(\omega_d t + \varphi_0) \quad (1)$$

自由分量第 N 次、N+1 次的振幅可以表示为：

$$\begin{aligned} A_N &= A_0 e^{\alpha t_N} \\ A_{N+1} &= A_0 e^{\alpha(t_N + T)} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{A_N}{A_{N+1}} = \frac{e^{\alpha t_N}}{e^{\alpha(t_N + T)}} = e^{\alpha \omega_n T} \quad (3)$$

$$\zeta = \frac{-\alpha}{\omega_n} \cong \frac{-\alpha}{\omega_d} \quad (4)$$

式中：

A_0 是初始幅值。

α 是衰减系数，它表征的是该模式的包络线衰减的快慢。当 $\alpha < 0$ 时， $t = -1/\alpha$ 为衰减到初始幅值的 0.632 所需要的时间。

ω_d 是低频振荡的角频率, $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ 。

ω_n 是系统无阻尼自然振荡频率。

φ_0 是初始相位。

ζ 是阻尼比, 它表征与复特征值相对应的振荡模式经过一次振荡后振幅的变化。

如图 2 和 3 所示, 衰减系数 α 和阻尼比 ζ 是动态稳定研究的重要指标, 二者的物理意义不同, 都可以用来判定每一个机电振荡模式的稳定性, 根据公式 (4) 可以看出, ζ 和 α 的符号是绝对反向的。根据特征值的实部 α 的大小和符号, 可以很容易判定每一个机电振荡模式的阻尼特性, 从而确定整个电力系统的稳定性:

(1) 当 $\alpha > 0$ 、 $\zeta < 0$ 时, 系统动态不稳定, 此时系统内有任意一个小扰动, 相应的时域响应曲线是增幅振荡的;

(2) 当 $\alpha = 0$, $\zeta = 0$, 阻尼为零, 相应的时域响应曲线是等幅的, 是临界状态, 对电力系统而言, 也应属不稳定范围;

(3) 当 $\alpha < 0$ 时, $\zeta > 0$, 相应的时域响应曲线是衰减的, α 绝对值越大, 衰减越快, 阻尼越好, 系统的稳定性也越好。

负阻尼低频振荡就是指当 $\alpha > 0$ 、 $\zeta < 0$ 时, 系统本身处于不稳定状态下发生的增幅振荡。在这种情况下, 只要系统内存在任意一个瞬时的小扰动, 都会引起系统的低频振荡, 且不能自主平息, 需要采取如降低联络线功率、投入 PSS 等增加系统阻尼等方法来平息振荡。

强迫振荡是指系统在动态稳定的状态下, 系统内发生持续的周期性小扰动所引起的低频振荡。此时, 系统响应的强迫分量为一等幅正弦振荡, 具有式 (5) 的形式, 自由分量有式 (6) 的形式。其振幅与扰动的幅值大小、系统的阻尼大小、同频系数相关。扰动的幅值越大、系统阻尼越弱、同频系数越接近 1, 振幅越大, 反之振幅越小。谐振引起的强迫振荡的增幅起振过程与负阻尼

低频振荡很相像，但是由于强迫振荡发生时系统的阻尼是正阻尼，所以当扰动源消失，振荡就以系统固有的阻尼比衰减平息，这是和负阻尼振荡不同的。。当扰动频率接近系统固有振荡频率时，会引起系统共振导致大幅度的振荡。设 $F_0 \sin \omega t$ 为持续周期性小扰动，其中 F_0 为扰动幅度， ω 为扰动频率，则系统的响应为

$$x_0 = B_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

$$x_1 = B_1 e^{\alpha t} \sin(\omega_d t + \psi) = B_1 e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\omega_d t + \psi) \quad (6)$$

强迫分量的幅值和相位角分别为

$$B = \frac{F_0 / K_s}{\sqrt{(1 - \nu^2)^2 + (2\zeta\nu)^2}} \approx \frac{F_0 / K_s}{2\zeta} \quad (7)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{2\zeta\nu}{1 - \nu^2} \quad (8)$$

式中：

$\nu = \frac{\omega}{\omega_n}$ -同频系数，当 $\omega \cong \omega_n$ 时， $\nu \cong 1$ 。

ζ -阻尼比。

K_s -同步力矩系数。

可以证明，对于有较大幅值、影响电力系统安全运行的强迫振荡，可以有 $\nu \cong 1$ 即 $\omega \cong \omega_d \cong \omega_n$ 、 $B_1 \approx -B_0$ 、 $\psi \approx \varphi$ 。

强迫振荡引起的低频振荡与负阻尼低频振荡的相似点为：（1）振荡的起始阶段都表现为增幅振荡；（2）增幅振荡都可能发展为等幅振荡。这使得如何正确、快速识别它们成为必须解决而又难于解决的问题。

（2）直线法的理论分析、判别负阻尼振荡及强迫振荡的判据

不失一般性，设发生低频振荡时的曲线可以表示为：

$$x = B \sin(\omega t) - B e^{\alpha t} \sin(\omega t)$$

设 $t = t_i$ 时，有 $x = x(t_i)$ 为振荡曲线 x 的上包络线上的一个极大值。则当 $\alpha > 0$ 时，

$t_i = \frac{k \cdot 2\pi + 1.5\pi}{\omega}$, 当 $\alpha < 0$ 时, $t_i = \frac{k \cdot 2\pi + 0.5\pi}{\omega}$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$, 曲线 x 达到每个振荡周期内的最大值。选取包络线上的两个时间点 t_N 和 $t_M = t_N + (M - N)T$ ($M - N > 2$, T 为振荡周期), 通过这两个点可以确定一条直线

$$F(t) = x(t_N) + \frac{x(t_M) - x(t_N)}{t_M - t_N}(t - t_N) \quad (9)$$

对于任意 $t_k = t_N + (k - N)T$, 有实际测量值 $x(t_k)$ 和根据式 (9) 确定的计算值

$$F(t_k) = x(t_N) + \frac{x(t_M) - x(t_N)}{t_M - t_N}(t_k - t_N), \text{ 两者之差为}$$

$$\Delta x(t_k) = F(t_k) - x(t_k) = x(t_N) + \frac{x(t_M) - x(t_N)}{t_M - t_N}(t_k - t_N) - x(t_k)$$

可以证明: (1) 当 $\alpha > 0$ (系统阻尼为负) 且 $t_N < t_k < t_M$ 时, 必有 $F(t_k) - x(t_k) > 0$; 当 $\alpha > 0$ 且 $t_M < t_k$ 时, 必有 $F(t_k) - x(t_k) < 0$ 。(2) 当 $\alpha < 0$ (系统阻尼为正) 且 $t_N < t_k < t_M$ 时, 必有 $F(t_k) - x(t_k) < 0$; 当 $\alpha < 0$ 且 $t_M < t_k$ 时, 必有 $F(t_k) - x(t_k) > 0$ 。

证明如下。

(1) 当 $\alpha > 0$ 且 $t_N < t_k < t_M$ 时, 有

$$\begin{aligned} x(t_k) &= B(e^{\alpha t_k} - 1) \\ x(t_N) &= B(e^{\alpha t_N} - 1) \\ x(t_M) &= B(e^{\alpha t_M} - 1) \end{aligned}$$

$$\Delta x(t_k) = B[e^{\alpha t_N} - e^{\alpha t_k} + \frac{e^{\alpha t_M} - e^{\alpha t_N}}{t_M - t_N}(t_k - t_N)]$$

欲有 $\Delta x(t_k) > 0$, 只需证明 (10) 成立即可。

$$e^{\alpha t_N} - e^{\alpha t_k} + \frac{e^{\alpha t_M} - e^{\alpha t_N}}{t_M - t_N}(t_k - t_N) > 0 \quad (10)$$

(10) 成立的条件是

$$\frac{e^{\alpha t_N} - e^{\alpha t_k}}{(t_k - t_N)} + \frac{e^{\alpha t_M} - e^{\alpha t_N}}{t_M - t_N} > 0 \quad (11)$$

式 (11) 中将 t_M 用 $t_N + \Delta t_M$ 表示、 t_k 用 $t_N + \Delta t_k$ 表示, 则可写为

$$\frac{e^{\alpha t_N} - e^{\alpha(\Delta t_k + t_N)}}{\Delta t_k} > \frac{e^{\alpha t_N} - e^{\alpha(\Delta t_M + t_N)}}{\Delta t_M} \quad (11')$$

不等式两边消去 $e^{\alpha t_N}$ ($e^{\alpha t_N} > 0$) 可得

$$\frac{1 - e^{\alpha \Delta t_k}}{\Delta t_k} > \frac{1 - e^{\alpha \Delta t_M}}{\Delta t_M} \quad (12)$$

已知 $\Delta t_k < \Delta t_M$ ，只需证明 $f(x) = \frac{1 - e^{\alpha x}}{x}$ 为减函数即可有 (12) 成立。 $f(x)$ 的一次导数为

$$f'(x) = \frac{e^{\alpha x}(1 - \alpha x) - 1}{x^2}$$

设 $g(x) = e^{\alpha x}(1 - \alpha x) - 1$ ，则其一次导数为

$$g'(x) = -\alpha^2 x e^{\alpha x} \quad (13)$$

因为 α^2 、 $e^{\alpha x}$ 均为正数，且有当 $x=0$ 时，有 $g'(x)=0$ ， $g(x)=0$ 。则

当 $x > 0$ 时，有 $g'(x) < 0$ ， $g(x) = e^{\alpha x}(1 - \alpha x) - 1$ 为 x 的减函数，且有 $g(x) < 0$ 。又因为 $x^2 > 0$ ， $f'(x) < 0$ ，所以 $f(x)$ 为 x 的减函数。因为 $\Delta t_k < \Delta t_M$ ，所以 (12)、(10) 式成立，命题当 $\alpha > 0$ （系统阻尼为负）且 $t_N < t_k < t_M$ 时，必有 $\Delta x(t_k) = F(t_k) - x(t_k) > 0$ 成立。

$$\begin{aligned} & \text{因为 } f(x) = \frac{1 - e^{\alpha x}}{x} \text{ 为减函数，所以， } t_M < t_k \text{ 时有 } \frac{1 - e^{\alpha \Delta t_k}}{\Delta t_k} < \frac{1 - e^{\alpha \Delta t_M}}{\Delta t_M}， \\ & \frac{1 - e^{\alpha \Delta t_k}}{\Delta t_k} - \frac{1 - e^{\alpha \Delta t_M}}{\Delta t_M} < 0， \quad \frac{e^{\alpha t_N} - e^{\alpha(\Delta t_k + t_N)}}{\Delta t_k} + \frac{e^{\alpha(\Delta t_M + t_N)} - e^{\alpha t_N}}{\Delta t_M} < 0， \quad \frac{e^{\alpha t_N} - e^{\alpha t_k}}{(t_k - t_N)} + \frac{e^{\alpha t_M} - e^{\alpha t_N}}{t_M - t_N} < 0， \\ & e^{\alpha t_N} - e^{\alpha t_k} + \frac{e^{\alpha t_M} - e^{\alpha t_N}}{t_M - t_N}(t_k - t_N) < 0， \text{ 所以有} \end{aligned}$$

$$\Delta x(t_k) = B[e^{\alpha t_N} - e^{\alpha t_k} + \frac{e^{\alpha t_M} - e^{\alpha t_N}}{t_M - t_N}(t_k - t_N)] < 0 < 0$$

(2) 依同理可得证：命题当 $\alpha < 0$ （系统阻尼为正）且 $t_N < t_k < t_M$ 时，必有 $\Delta x(t_k) = F(t_k) - x(t_k) < 0$ ；当 $\alpha < 0$ 且 $t_M < t_k$ 时，必有 $\Delta x(t_k) = F(t_k) - x(t_k) > 0$ 成立。

根据以下实施例对直线法判别负阻尼振荡与强迫振荡的方法做进一步描述。

通过 PMU 或 WAMS 的数据,选取一个与电力系统稳定关系密切的机电量(例如,有功功率、频率或转速),在初始十几个周波内快速识别出某个低频振荡是由于系统缺乏阻尼而导致的负阻尼低频振荡、还是由于系统中存在强迫扰动源引发的强迫振荡,以便快速采取抑制低频振荡的措施。

一种直线法判别负阻尼振荡与强迫振荡的方法,包括如下步骤:

- (1).获取实测振荡曲线;
- (2).选取每个振荡周期内最大值时刻点(应至少选取 5-7 个点)进行分析;
- (3).确认这是一个增幅振荡;
- (4).选取间隔大于 4 个振荡周期的两点形成直线方程;
- (5).比较直线方程时间段内各点的测量值与直线上之值的关系来辨别振荡性质,比较直线方程时间段外若干点的测量值与直线上之值的关系来再次确认振荡性质辨别结果的正确性。

在所述步骤 2 中,基于实测振荡曲线,取每个振荡周期内最大值点的数值进行分析,为了减少测量误差或者噪声等的影响,应至少取 5-7 个周波的数值进行计算。

所述实测振荡曲线包括与电力系统稳定关系密切的机电量:枢纽点、变电站母线的频率信号、联络线和发电机机端的功率、频率、转速信号曲线。

振荡曲线表示为: $x = B \sin(\omega t) - B e^{\alpha t} \sin(\omega t)$, 设 $t = t_i$ 时,有 $x = x(t_i)$ 为振荡曲线 x 的上包络线上的一个极大值。则当 $\alpha > 0$ 时, $t_i = \frac{k \cdot 2\pi + 1.5\pi}{\omega}$, 当 $\alpha < 0$ 时, $t_i = \frac{k \cdot 2\pi + 0.5\pi}{\omega}$, $k = 0, 1, 2, 3 \dots$, 曲线 x 达到每个振荡周期内的最大值。选取包络线

上的两个时间点 t_N 和 $t_M = t_N + (M - N)T$ ($M - N > 2$, T 为振荡周期), 通过这两个点可以确定一条直线 $F(t_k) = x(t_N) + \frac{x(t_M) - x(t_N)}{t_M - t_N}(t_k - t_N)$ 。

对于任意 $t_k = t_N + (k - N)T$, 有实际测量值 $x(t_k)$ 和直线公式确定的计算值

$F(t_k) = x(t_N) + \frac{x(t_M) - x(t_N)}{t_M - t_N}(t_k - t_N)$, 两者之差为:

$$\Delta x(t_k) = F(t_k) - x(t_k) = x(t_N) + \frac{x(t_M) - x(t_N)}{t_M - t_N}(t_k - t_N) - x(t_k)$$

(1) 当 $\alpha > 0$ (系统阻尼为负) 且 $t_N < t_k < t_M$ 时, 必有 $F(t_k) - x(t_k) > 0$; 当 $\alpha > 0$ 且 $t_M < t_k$ 时, 必有 $F(t_k) - x(t_k) < 0$ 。

(2) 当 $\alpha < 0$ (系统阻尼为正) 且 $t_N < t_k < t_M$ 时, 必有 $F(t_k) - x(t_k) < 0$; 当 $\alpha < 0$ 且 $t_M < t_k$ 时, 必有 $F(t_k) - x(t_k) > 0$ 。

其中, B 是振荡幅值; α 是衰减系数; ω 是振荡的角频率。

需要声明的是, 本发明内容及具体实施方式意在证明本发明所提供技术方案的实际应用, 不应解释为对本发明保护范围的限定。本领域技术人员在本发明的精神和原理启发下, 可作各种修改、等同替换、或改进。但这些变更或修改均在申请待批的保护范围内。

权 利 要 求

1、一种基于直线法判别负阻尼振荡与强迫振荡的方法，其特征在于，所述方法包括如下步骤：

- (1).获取实测振荡曲线；
- (2).选取每个振荡周期内最大值时刻点进行分析；
- (3).确认振荡为增幅振荡；
- (4).选取间隔大于 4 个振荡周期的两点形成直线方程；
- (5).对同一时间点在直线与实测曲线上的数值逐一作差，根据得到的结果对振荡类型进行判断。

2、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，在所述步骤 1 中，通过 PMU 或 WAMS 的数据获取实测振荡曲线，对实测振荡曲线进行处理，得到主导振荡模式的正弦信号。

3、根据权利要求 1 或者 2 所述的方法，其特征在于，所述实测振荡曲线包括：枢纽点、变电站母线的频率信号、联络线和发电机机端的有功功率信号曲线。

4、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，在所述步骤 2 中，选取的最大值时刻点为 5-7 个。

5、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，在所述步骤 5 中，比较直线方程时间段内各点的测量值与直线上之值的关系来辨别振荡性质，比较直线方程时间段外若干点的测量值与直线上之值的关系来再次确认振荡性质辨别结果的正确性。

6、根据权利要求 5 所述的方法，其特征在于，振荡曲线表示为：

$x = B \sin(\omega t) - B e^{\alpha t} \sin(\omega t)$ ，设 $t = t_i$ 时，有 $x = x(t_i)$ 为振荡曲线 x 的上包络线上的一个极大值；

则当 $\alpha > 0$ 时， $t_i = \frac{k \cdot 2\pi + 1.5\pi}{\omega}$ ，当 $\alpha < 0$ 时， $t_i = \frac{k \cdot 2\pi + 0.5\pi}{\omega}$ ， $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ ，曲线 x 达到每个振荡周期内的最大值 $x(t_i)$ ；选取包络线上的两个时间点 t_N 和 t_M ， $t_M = t_N + (M - N)T$ ，通过这两个点可以确定一条直线 $F(t_k) = x(t_N) + \frac{x(t_M) - x(t_N)}{t_M - t_N}(t_k - t_N)$ ，其中， $M - N > 2$ ， T 为振荡周期；

对于任意 $t_k = t_N + (k - N)T$ ，有实际测量值 $x(t_k)$ 和直线公式确定的计算值

$F(t_k) = x(t_N) + \frac{x(t_M) - x(t_N)}{t_M - t_N}(t_k - t_N)$ ，两者之差为：

$$\Delta x(t_k) = F(t_k) - x(t_k) = x(t_N) + \frac{x(t_M) - x(t_N)}{t_M - t_N}(t_k - t_N) - x(t_k)$$

式中： $F(t_k)$ 表示 t_k 时刻对应直线上的数值；

$x(t_k)$ 表示 t_k 时刻对应振荡曲线上的数值。

(1). 当 $\alpha > 0$ 且 $t_N < t_k < t_M$ 时，必有 $F(t_k) - x(t_k) > 0$ ；当 $\alpha > 0$ 且 $t_M < t_k$ 时，必有 $F(t_k) - x(t_k) < 0$ ；

(2). 当 $\alpha < 0$ 且 $t_N < t_k < t_M$ 时，必有 $F(t_k) - x(t_k) < 0$ ；当 $\alpha < 0$ 且 $t_M < t_k$ 时，必有 $F(t_k) - x(t_k) > 0$ ；

其中， B 是振荡幅值； α 是衰减系数； ω 是振荡的角频率。

7、根据权利要求 6 所述的方法，其特征在于，差值为正则振荡曲线模式为负阻尼振荡；否则振荡曲线模式为强迫振荡。

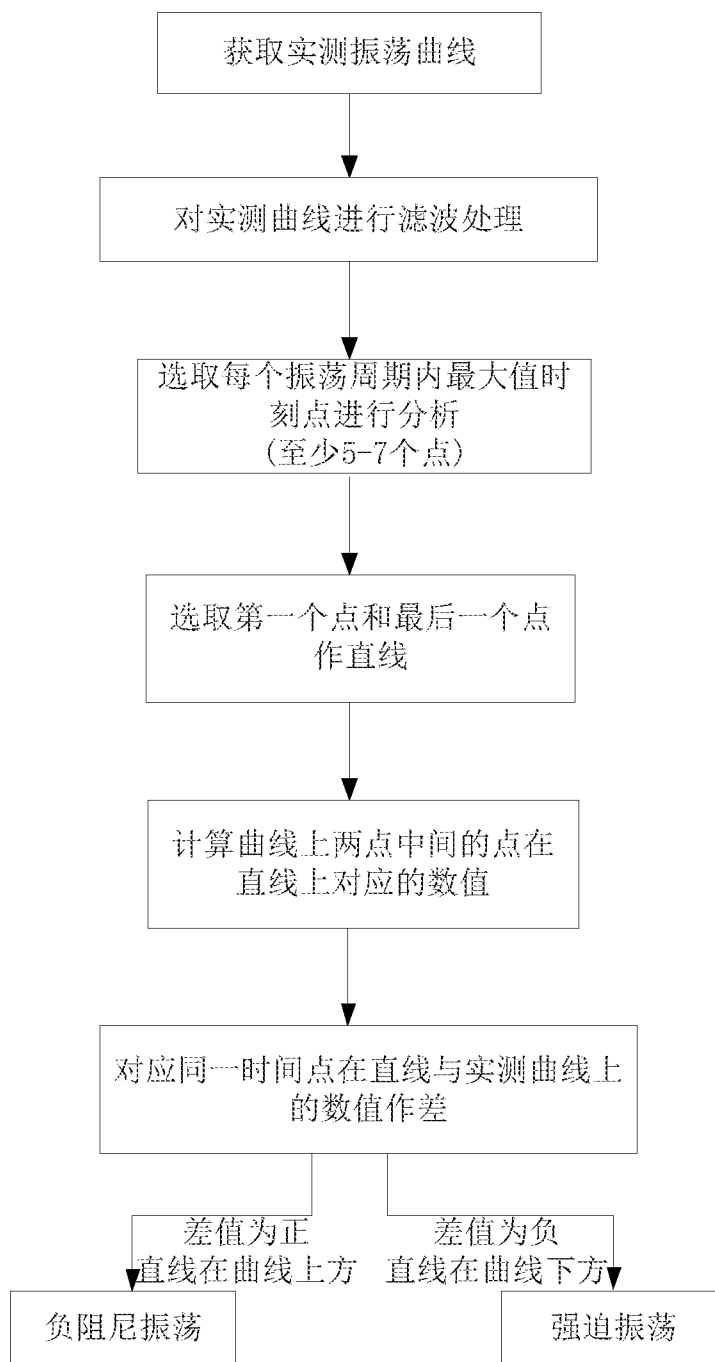
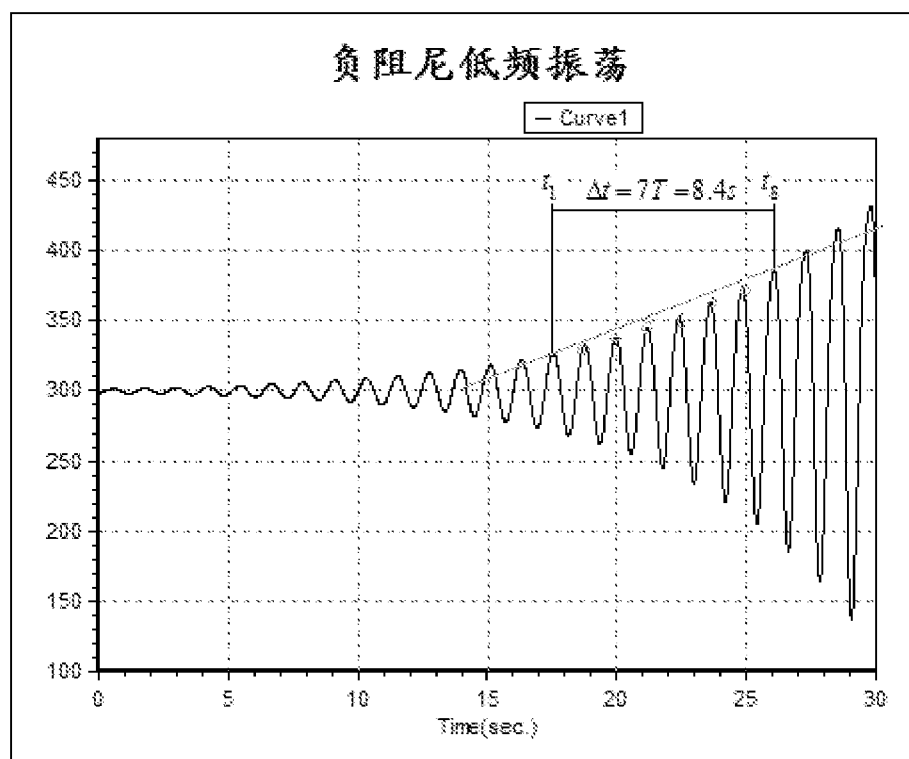
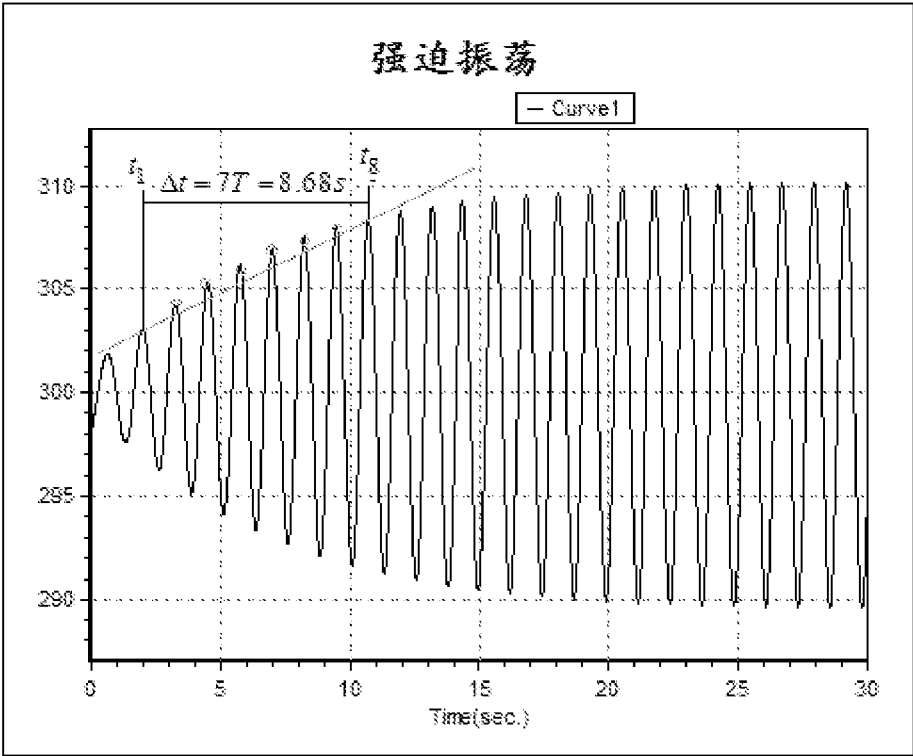


图 1



No	t/s(max)	$A_{N\max}/\text{MW}$	$F(t)/\text{MW}$	$G(t)/\text{MW}$	判据
1	17.61	328	-	-	-
2	18.77	333.33	336.0991	2.76912	正
3	20	338.36	344.687	6.32698	正
4	21.2	345	353.0654	8.06538	正
5	22.41	354.76	361.5136	6.7536	正
6	23.66	363	370.2411	7.2411	正
7	24.85	374.57	378.5497	3.97968	正
8	26.07	387.07	-	-	-

图 2



No	t/s(max)	A_{Nmax} /MW	$F(t)$ //MW	$G(t)$ //MW	判据
1	2	303.03	-	-	-
2	3.25	304.34	303.7671	-0.57288	负
3	4.51	305.29	304.5101	-0.77985	负
4	5.74	306.27	305.2355	-1.03452	负
5	6.99	306.97	305.9726	-0.9974	负
6	8.21	307.57	306.692	-0.87796	负
7	9.45	308	307.4233	-0.57674	负
8	10.67	308.53	308.1427	-0.3873	-
9	11.92	308.88	-	-	-

图 3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2013/084402

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

See the extra sheet

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC: G01R; H02J 3/-

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS, CNTXT, CNKI, DWPI, SIPOABS: oscillation, oscillating, oscillate, oscillated, vibration, vibrating, vibrate, vibrated, chugging, hunting, linear, line, lines, aligning, translational, lining, alinement, constrained, forced, max, maximum, crest, maximization, peak, peaks, peaking, maximal, largest, damp, damped, sustained, dying, damping, curve, waveform, wave shape, wave pattern, wave profile

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 102928695 A (CHINA ELECTRIC POWER RES. INST., et al.) 13 February 2013 (13.02.2013) claims 1 to 7	1-7
A	CN 102650666 A (CHINA ELECTRIC POWER RES. INST.) 29 August 2012 (29.08.2012) claims 1 to 8	1-7
A	CN 102650657 A (CHINA ELECTRIC POWER RES. INST.) 29 August 2012 (29.08.2012) the whole document	1-7

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date	“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	“&” document member of the same patent family
“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 25 December 2013 (25.12.2013)	Date of mailing of the international search report 02 January 2014 (02.01.2014)
Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10) 62019451	Authorized officer MIAO, Wen Telephone No. (86-10) 62085340

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2013/084402

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 102055201 A (BEIJING SIFANG AUTOMATION CO., LTD.) 11 May 2011 (11.05.2011) the whole document	1-7
A	US 2009099798 A1 (SCHWEITZER ENG. LAB. INC.) 16 April 2009 (16.04.2009) the whole document	1-7
A	EP 1489714 A1 (ABB RESEARCH LTD.) 22 December 2004 (22.12.2004) the whole document	1-7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2013/084402

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 102928695 A	13.02.2013	None	
CN 102650666 A	29.08.2012	None	
CN 102650657 A	29.08.2012	None	
CN 102055201 A	11.05.2011	CN 102055201 B	14.11.2012
US 2009099798 A1	16.04.2009	US 7987059 B2	26.07.2011
		WO 2009048964 A1	16.04.2009
EP 1489714 A1	22.12.2004	DE 60318408 D1	14.02.2008
		ES 2299678 T3	01.06.2008
		DE 60318408 T2	29.01.2009
		US 7149637 B2	12.12.2006
		EP 1489714 B1	02.01.2008
		US 2005187726 A1	25.08.2005

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2013/084402

Continuation: A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01R 31/00 (2006.01) i

H02J 3/24 (2006.01) i

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2013/084402

A. 主题的分类

参见附加页

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

IPC: G01R; H02J3/-

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNABS,CNTEXT,CNKI: 振荡, 震荡, 振动, 低频振荡, 阻尼振荡, 强迫振荡, 强制振荡, 增幅振荡, 模式, 模态, 类型, 判别, 识别, 辨识, 辨别, 直线, 线性, 最大值, 峰值

DWPI,SIPOABS: oscillation, oscillating, oscillate, oscillated, vibration, vibrating, vibrate, vibrated, chugging, hunting, linear, line, lines, aligning, translational, lining, alinement, constrained, forced, max, maximum, crest, maximization, peak, peaks, peaking, maximal, largest, damp, damped, sustained, dying, damping, curve, waveform, wave shape, wave pattern, wave profile

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 102928695 A (中国电力科学研究院 等) 13.2 月 2013 (13.02.2013) 权利要求 1-7	1-7
A	CN 102650666 A (中国电力科学研究院) 29.8 月 2012 (29.08.2012) 权利要求 1-8	1-7
A	CN 102650657 A (中国电力科学研究院) 29.8 月 2012 (29.08.2012) 全文	1-7
A	CN 102055201 A (北京四方继保自动化股份有限公司 等) 11.5 月 2011 (11.05.2011) 全文	1-7
A	US 2009099798 A1 (SCHWEITZER ENG. LAB. INC.) 16.4 月 2009 (16.04.2009) 全文	1-7

☒ 其余文件在 C 栏的续页中列出。

☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期
25.12 月 2013 (25.12.2013)

国际检索报告邮寄日期
02.1 月 2014 (02.01.2014)

ISA/CN 的名称和邮寄地址:
中华人民共和国国家知识产权局
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路 6 号 100088
传真号: (86-10)62019451

受权官员

苗文
电话号码: (86-10) **62085340**

C(续). 相关文件		
类 型	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	EP 1489714 A1 (ABB RESEARCH LTD.) 22.12 月 2004 (22.12.2004) 全文	1-7

国际检索报告

关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2013/084402

检索报告中引用的 专利文件	公布日期	同族专利	公布日期
CN 102928695 A	13.02.2013	无	
CN 102650666 A	29.08.2012	无	
CN 102650657 A	29.08.2012	无	
CN 102055201 A	11.05.2011	CN 102055201 B	14.11.2012
US 2009099798 A1	16.04.2009	US 7987059 B2	26.07.2011
		WO 2009048964 A1	16.04.2009
EP 1489714 A1	22.12.2004	DE 60318408 D1	14.02.2008
		ES 2299678 T3	01.06.2008
		DE 60318408 T2	29.01.2009
		US 7149637 B2	12.12.2006
		EP 1489714 B1	02.01.2008
		US 2005187726 A1	25.08.2005

续: A. 主题的分类

G01R 31/00 (2006.01) i

H02J 3/24 (2006.01) i