

(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 7 月 17 日 (17.07.2014)



(10) 国际公布号
WO 2014/107997 A1

- (51) 国际专利分类号:
H02J 3/00 (2006.01)
- (21) 国际申请号:
PCT/CN2013/087999
- (22) 国际申请日:
2013 年 11 月 28 日 (28.11.2013)
- (25) 申请语言:
中文
- (26) 公布语言:
中文
- (30) 优先权:
201310008091.9 2013 年 1 月 9 日 (09.01.2013) 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: 汤涌 (TANG, Yong); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 吴为 (WU, Wei); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 孙华东 (SUN, Huadong); 中

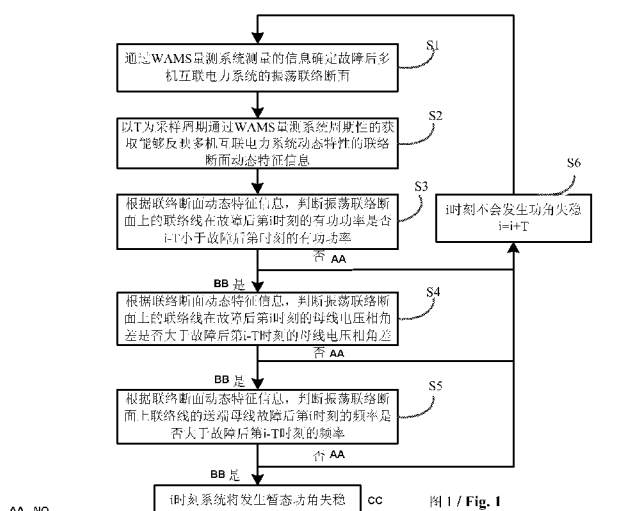
国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 何剑 (HE, Jian); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。

- (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, IR, 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 REAL-TIME DISCRIMINATION OF TRANSIENT POWER ANGLE DESTABILIZATION BASED ON ACTUALLY-MEASURED RESPONSE INFORMATION

(54) 发明名称: 一种基于实测响应信息的暂态功角失稳实时判别的方法



AA NO
BB YES
S1 DETERMINING AN OSCILLATION TIE SECTION OF A MULTI-MACHINE INTERCONNECTED ELECTRIC POWER SYSTEM AFTER A FAILURE VIA INFORMATION MEASURED BY A WAMS MEASUREMENT SYSTEM
S2 TAKING T AS A SAMPLING PERIOD, AND PERIODICALLY ACQUIRING DYNAMIC FEATURE INFORMATION ABOUT THE TIE SECTION CAPABLE OF REFLECTING THE DYNAMIC CHARACTERISTIC OF THE MULTI-MACHINE INTERCONNECTED ELECTRIC POWER SYSTEM BY THE WAMS MEASUREMENT SYSTEM
S3 ACCORDING TO THE DYNAMIC FEATURE INFORMATION ABOUT THE TIE SECTION, JUDGING WHETHER THE ACTIVE POWER OF A TIE LINE ON THE OSCILLATION TIE SECTION AT THE ITH MOMENT AFTER THE FAILURE IS SMALLER THAN THE ACTIVE POWER AT THE (I-T)TH MOMENT AFTER THE FAILURE
S4 ACCORDING TO THE DYNAMIC FEATURE INFORMATION ABOUT THE TIE SECTION, JUDGING WHETHER THE BUS VOLTAGE PHASE ANGLE DIFFERENCE OF THE TIE LINE ON THE OSCILLATION TIE SECTION AT THE ITH MOMENT AFTER THE FAILURE IS GREATER THAN THE BUS VOLTAGE PHASE ANGLE DIFFERENCE AT THE (I-T)TH MOMENT AFTER THE FAILURE
S5 ACCORDING TO THE DYNAMIC FEATURE INFORMATION ABOUT THE TIE SECTION, JUDGING WHETHER THE FREQUENCY OF A SENDING-END BUS OF THE TIE LINE ON THE OSCILLATION TIE SECTION AT THE ITH MOMENT AFTER THE FAILURE IS GREATER THAN THE FREQUENCY AT THE (I-T)TH MOMENT AFTER THE FAILURE
S6 POWER ANGLE DESTABILIZATION WILL NOT OCCUR AT THE ITH MOMENT I=i+T
CC TRANSIENT POWER ANGLE DESTABILIZATION WILL OCCUR AT THE ITH MOMENT

(57) Abstract: A method for real-time discrimination of transient power angle destabilization based on actually-measured response information for judging transient power angle stability after a multi-machine interconnected electric power system has failed, comprising: determining an oscillation tie section of a multi-machine interconnected electric power system; acquiring dynamic feature information about the tie section; according to the dynamic feature information about the tie section, when the three conditions are determined to be satisfied at the same time that the active power of a tie line on the oscillation tie section at the i^{th} moment after a failure is smaller than the active power at the $(i-T)^{\text{th}}$ moment after the failure and the bus voltage phase angle difference thereof is greater than the bus voltage phase angle difference at the $(i-T)^{\text{th}}$ moment after the failure, and the frequency of a sending-end bus of the tie line on the oscillation tie section at the i^{th} moment after the failure is greater than the frequency at the $(i-T)^{\text{th}}$ moment after the failure, determining that transient power angle destabilization will occur in the multi-machine interconnected electric power system at the i^{th} moment after the failure, otherwise, determining that transient power angle destabilization will not occur in the multi-machine interconnected electric power system at the i^{th} moment after the failure, taking full consideration of the nonlinear characteristic of the system, and being capable of accurately analyzing the transient power angle stability after the system is disturbed.

(57) 摘要:

[见续页]



WO 2014/107997 A1



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))。

一种用来判断多机互联电力系统故障后的暂态功角稳定性的基于实测响应信息的暂态功角失稳实时判别方法, 包括: 确定多机互联电力系统的振荡联络断面; 获取联络断面动态特征信息; 根据联络断面动态特征信息, 判断振荡联络断面上的联络线在故障后第 i 时刻的有功功率小于故障后第 $i-T$ 时刻的有功功率、母线电压相角差大于故障后的第 $i-T$ 时刻的母线电压相角差和振荡联络断面上联络线的送端母线故障后第 i 时刻的频率大于故障后第 $i-T$ 时刻的频率三个条件同时成立时, 判断多机互联电力系统在故障后第 i 时刻将发生暂态攻角失稳, 否则判断多机互联电力系统在故障后 i 时刻不会发生暂态攻角失稳, 充分考虑了系统的非线性特性, 能准确分析系统受扰后的暂态功角稳定性。

一种基于实测响应信息的暂态功角失稳实时判别的方法

技术领域

本发明涉及电力系统领域，具体涉及一种基于实测响应信息的暂态功角失稳实时判别的方法。

背景技术

随着特高压大电网的建设、新能源发电和新型电力电子设备的引入，电网规模不断扩大，复杂程度不断增加，系统的动态特性也更加复杂。区域电力系统的互联提高了能源的大范围优化配置能力，同时也可能使区域内的局部故障通过区域间的联络断面向更大范围扩散，使大电网的安全稳定运行面临更大的挑战。

对于多机互联大规模电力系统，暂态稳定问题是人们关注的焦点。随着联网规模越来越大，“离线决策，在线匹配”和“在线决策，实时匹配”的暂态稳定分析与控制模式已不能满足大电网安全稳定运行要求，逐渐向“实时决策，实时控制”的方向发展。为满足实时分析的要求，已有的暂态稳定分析方法主要集中在实时/超实时时域仿真法和直接法的研究上。这些方法的研究，极大地提高了暂态稳定分析的速度。基于实测响应数据的实时暂态稳定分析与控制本质上是一种基于实测数据的“响应控制”模式，能满足“实时决策，实时控制”的要求，其关键在于快速暂态稳定判据的研究。目前对快速暂态稳定判据的研究，主要集中在利用广域信息，根据 $p-\delta$ 轨迹穿越动态鞍点时的斜率和功率，研究当轨迹遇到动态鞍点时的失稳判据。基于发电机动能-功角曲线的扩展相平面，研究故障后发电机在保持稳定、首摆失稳和滑行失步三种情况下的暂态稳定指标判据。基于轨迹分析法，从能量函数入手，研究多摆稳定性识别判据。基于轨迹几何特征，研究识别多机系统的暂态不稳定性判据。这些方法的研究，丰富了快速稳定判据的研究理论，但是存在计算速度过慢，识别不够准确等问题。

发明内容

本发明涉及一种基于实测响应信息的暂态功角失稳实时判别的方法，判断多机互联电力系统在故障后的暂态功角稳定性，所述方法包括：

步骤 S1，通过 WAMS 量测系统测量的信息确定故障后所述多机互联电力系统的振荡联络断面；

步骤 S2，以 T 为采样周期通过所述 WAMS 量测系统周期性的获取能够反映所述多机互联电力系统动态特性的联络断面动态特征信息；

步骤 S3，根据所述联络断面动态特征信息，判断所述振荡联络断面上的联络线在故障后

第 i 时刻的有功功率是否小于故障后第 $i-T$ 时刻的有功功率，是，执行步骤 S4，否，执行步骤 S6；

步骤 S4，根据所述联络断面动态特征信息，判断所述振荡联络断面上的联络线在故障后第 i 时刻的母线电压相角差是否大于故障后第 $i-T$ 时刻的母线电压相角差，是，执行步骤 S5，否，执行步骤 S6；

步骤 S5，根据所述联络断面动态特征信息，判断所述振荡联络断面上联络线的送端母线故障后第 i 时刻的频率是否大于故障后第 $i-T$ 时刻的频率，是，判断所述多机互联电力系统在故障后第 i 时刻将发生暂态功角失稳，否，执行步骤 S6；

步骤 S6，判断所述多机互联电力系统在故障后 i 时刻不会发生暂态功角失稳，设置 i 的值为 $i=i+T$ ，执行步骤 S1。

本发明提供的第一优选实施例中：所述步骤 S1 中，通过 WAMS 量测系统测量的信息确定故障后系统的振荡联络断面后，确定处于所述振荡联络断面上的联络线。

本发明提供的第二优选实施例中：当所述多机互联电力系统中有多条所述联络线有功功率发生振荡时，任意一条所述联络线上变量的变化趋势满足失稳条件时，则说明所述多机互联电力系统间发生振荡失稳；在所述振荡中心处于多条所述联络线的情况下，对每条所述联络线单独进行暂态功角失稳判断。

本发明提供的第三优选实施例中：所述步骤 S2 中，从故障后开始通过所述 WAMS 量测系统周期性的获取能够反映多机互联电力系统动态特性的联络断面动态特征信息，所述联络断面动态特征信息的采样周期 T 与所述 WAMS 量测系统中的 PMU 测量单元的采样周期相同；

所述联络断面动态特征信息包括不同时刻振荡联络断面上不同联络线的有功功率、联络线首末端电压相角及联络线送端母线频率；其中，故障后第 i 时刻振荡联络断面上第 k 条联络线的有功功率为 P_{ek}^i ，联络线首末端电压相角分别为 δ_{k1}^i 、 δ_{k2}^i ，联络线送端母线频率为 f_k^i 。

本发明提供的第四优选实施例中：所述步骤 S3 中根据所述联络断面动态特征信息，判断所述振荡联络断面上的联络线在故障后第 i 时刻的有功功率是否大于故障后第 $i-T$ 时刻的有功功率的方法为：

故障后第 i 时刻和第 $i-T$ 时刻所述振荡联络断面上第 k 条联络线的有功功率分别为 P_{ek}^i 和 P_{ek}^{i-T} ；

根据所述联络断面动态特征信息判断 $P_{ek}^i - P_{ek}^{i-T} < 0$ 时所述振荡联络断面上的所述第 k 条联络线在故障后第 i 时刻的有功功率小于故障后第 $i-T$ 时刻的有功功率。

本发明提供的第五优选实施例中：所述步骤 S4 中根据所述联络断面动态特征信息，判断所述振荡联络断面上的所述联络线在故障后第 i 时刻的母线电压相角差是否大于故障后第 $i-T$ 时刻的母线电压相角差的方法为：

故障后第 i 时刻所述振荡联络断面上第 k 条联络线的母线电压相角差为： $\theta_k^i = \delta_{k1}^i - \delta_{k2}^i$ ；

所述振荡联络断面上的所述第 k 条联络线在故障后第 i 时刻的母线电压相角差 θ_k^i 与故障后第 $i-T$ 时刻的母线电压相角差 θ_k^{i-T} 的差为： $\theta_k^i - \theta_k^{i-T} = (\delta_{k1}^i - \delta_{k2}^i) - (\delta_{k1}^{i-T} - \delta_{k2}^{i-T})$ ；

根据所述联络断面动态特征信息判断 $(\delta_{k1}^i - \delta_{k2}^i) - (\delta_{k1}^{i-T} - \delta_{k2}^{i-T}) > 0$ 时所述振荡联络断面上的所述第 k 条联络线在故障后第 i 时刻的母线电压相角差大于故障后第 $i-T$ 时刻的母线电压相角差。

本发明提供的第六优选实施例中

所述步骤 S5 中根据所述联络断面动态特征信息，判断所述振荡联络断面上的联络线的送端母线故障后第 i 时刻的频率是否大于故障后第 $i-T$ 时刻的频率的方法为：

故障后第 i 时刻和第 $i-T$ 时刻所述振荡联络断面上第 k 条联络线的送端母线的频率分别为 f_k^i 和 f_k^{i-T} ；

根据所述联络断面动态特征信息判断 $\Delta f_k^i = f_k^i - f_k^{i-T} > 0$ 时所述振荡联络断面上的所述第 k 条联络线在故障后第 i 时刻的送端母线的频率大于故障后第 $i-T$ 时刻的频率。本发明提供的一种基于实测响应信息的暂态功角失稳实时判别方法的有益效果包括：

本发明提供的一种基于实测响应信息的暂态功角失稳实时判别的方法，通过 WAMS 量测系统测量的信息识别多机互联电力系统的振荡联络断面，提取能反映振荡系统间暂态功角稳定特性的实时响应信息，根据该实时响应信息对暂态功角稳定性进行实时分析，为大规模电力系统的安全稳定运行提供技术支撑。

采用功率-相角-频率作为快速判断电力系统暂态功角稳定性的判据，其中功率、相角和频率均可以通过 WAMS 量测系统测量的实时响应信息直接获得，使判断更为直观快捷，使该判断方法更具实用性。

附图说明

如图 1 所示为本发明提供的一种基于实测响应信息的暂态功角失稳实时判别的方法流程图；

如图 2 所示为本发明提供的振荡区域系统示意图；

如图 3 所示为本发明提供的等值两机系统结构示意图；

如图 4 所示为本发明提供的等值两机系统的等值电路图；

如图 5 所示为本发明提供的等值两机系统的相量图；

如图 6 所示为本发明提供的联络线的等效电路图；

如图 7 所示为本发明提供的区域多机互联电力系统的网架结构的实施例的示意图；

如图 8 所示为本发明提供的区域多机互联电力系统相角差和有功功率的随时间的变化趋势曲线图；

如图 9 所示为本发明提供的区域多机互联电力系统母线频率随时间的变化趋势曲线图。

具体实施方式

本发明提供一种基于实测响应信息的暂态功角失稳实时判别的方法，通过 WAMS (Wide Area Measurement System, 广域监测系统)量测系统测量的信息识别多机互联电力系统的振荡联络断面，提取能够反映振荡系统间暂态功角稳定特性的实测响应信息，根据该实测响应信息对多机互联电力系统的暂态稳定性进行实时分析。具体的，该方法的流程图如图 1 所示，由图 1 可知，该方法包括：

步骤 S1，通过 WAMS 量测系统测量的信息确定故障后多机互联电力系统的振荡联络断面。

步骤 S2，以 T 为采样周期通过 WAMS 量测系统周期性的获取能够反映多机互联电力系统动态特性的联络断面动态特征信息。

步骤 S3，根据联络断面动态特征信息，判断振荡联络断面上的联络线在故障后第 i 时刻的有功功率是否小于故障后第 $i-T$ 时刻的有功功率，是，执行步骤 S4，否，执行步骤 S6。

步骤 S4，根据联络断面动态特征信息，判断振荡联络断面上的联络线在故障后第 i 时刻的母线电压相角差是否大于故障后第 $i-T$ 时刻的母线电压相角差，是，执行步骤 S5，否，执行步骤 S6。

步骤 S5，根据联络断面动态特征信息，判断振荡联络断面上联络线的送端母线故障后第 i 时刻的频率是否大于故障后第 $i-T$ 时刻的频率，是，判断该多机互联电力系统在故障后第 i 时刻将发生暂态功角失稳，否，执行步骤 S6。

步骤 S6，判断该多机互联电力系统在故障后 i 时刻不会发生暂态功角失稳，设置 i 的值为 $i = i + T$ ，执行步骤 S1。

步骤 S6 中在判断该多机互联电力系统在故障后 i 时刻不会发生暂态功角失稳后，设置 i 的值为 $i = i + T$ ，执行步骤 S1，即判断经过采样周期 T 时间后该多机互联电力系统的暂态功角稳定性。

实施例一：

本发明提供的实施例一为本发明提供的一种基于 WAMS 量测信息的暂态功角失稳实时判别的方法的实施例。

具体的，该实施例中多机互联电力系统的暂态功角稳定性实时判别，从故障后开始通过 WAMS 系统进行测量。步骤 S1 中，通过 WAMS 系统测量的测量信息确定故障后多机互联电力系统的振荡联络断面，识别处于振荡中心的联络线，从而将多机互联电力系统划分为振荡两区域系统。

步骤 S2 中，从故障后开始通过 WAMS 量测系统周期性的获取能够反映多机互联电力系统动态特性的联络断面动态特征信息，该联络断面动态特征信息的采样周期 T 与 WAMS 量测系统中的 PMU(Phasor Measurement Unit, 同步相角测量单元)测量单元的采样周期相同，包括不同时刻振荡联络断面上不同联络线的有功功率、线路首末端电压相角及联络线送端母线频率。其中，故障后第 i 时刻振荡联络断面上第 k 条联络线的有功功率为 P_{ek}^i ，联络线首末端电压相角分别为 δ_{k1}^i 、 δ_{k2}^i ，联络线送端母线频率为 f_k^i 。

如图 2 所示的振荡两区域系统的示意图，两区域分别为区域 A 和区域 B，区域 A 和区域 B 中包含有多台发电机，将区域 A 的系统和区域 B 的系统分别进行等值，可得到如图 3 和图 4 所示的等值两机系统的结构示意图及等值电路图，图 5 为等值两机系统的相量图。

根据振荡联络断面实测响应信息识别系统暂态功角失稳的原理和方法为：

区域 A 和区域 B 之间联络线上的有功功率为 P_{eAB} ，区域 A 和区域 B 之间联络线两端的相角差为 θ ，维持区域 A 和区域 B 之间联络线有功功率的原动机机械功率为 P_{mAB} ，则区域 A 和区域 B 之间联络线上反映的系统动态稳定特性如表一所示。

表一：联络线信息变化对应系统动态稳定特性表

序号	联络线信息变化量关系	稳定性
1	$\Delta P_{eAB} > 0, \Delta \theta > 0, P_{mAB} < P_{eAB}$	功角稳定
2	$\Delta P_{eAB} > 0, \Delta \theta > 0, P_{mAB} > P_{eAB}$	功角稳定
3	$\Delta P_{eAB} > 0, \Delta \theta < 0, P_{mAB} < P_{eAB}$	功角稳定
4	$\Delta P_{eAB} < 0, \Delta \theta < 0, P_{mAB} < P_{eAB}$	功角稳定
5	$\Delta P_{eAB} < 0, \Delta \theta < 0, P_{mAB} > P_{eAB}$	功角稳定
6	$\Delta P_{eAB} < 0, \Delta \theta > 0, P_{mAB} < P_{eAB}$	功角稳定
7	$\Delta P_{eAB} < 0, \Delta \theta > 0, P_{mAB} > P_{eAB}$	功角失稳

表一中 ΔP_{eAB} 表示区域 A 和区域 B 之间联络线上的有功功率的变化量， $\Delta \theta$ 表示区域 A 和

区域 B 之间联络线两端的相角差的变化量, 由表一可知, $\Delta P_{eAB} > 0$, $\Delta \theta < 0$, $P_{mAB} > P_{eAB}$ 这种情况不存在除外, 联络线信息中只有当区域 A 和区域 B 之间联络线上的有功功率的变化量 $\Delta P_{eAB} < 0$, 区域 A 和区域 B 之间联络线两端的相角差的变化量 $\Delta \theta > 0$, 区域 A 和区域 B 之间联络线上的有功功率的原动机机械功率 P_{mAB} 大于有功功率 P_{eAB} 时, 该 A 区域和 B 区域组成的多机互联电力系统才会发生暂态功角失稳。

当多机互联电力系统有多条联络线有功功率发生振荡时, 对振荡中心所在的每条联络线, 其输送的有功功率与所对应的机械功率同样具有表一所示的性质。当观察到任意一条联络线上变量的变化趋势满足失稳条件时, 则说明该多机互联电力系统间发生振荡失稳。因此振荡中心处于多条联络线的情况下, 只需对每条联络线单独进行分析判断。

具体的, 联络线上的有功功率和两端的相角差的变化量取故障后第 i 时刻相对第 $i-T$ 时刻的变化量, 即满足 $P_{ek}^i < P_{ek}^{i-T}$ 、 $\theta_k^i < \theta_k^{i-T}$ 和 $P_{mk}^i > P_{ek}^i$ 时, 多机互联电力系统会发生暂态功角失稳。其中 P_{ek}^i 、 θ_k^i 和 P_{mk}^i 分别表示故障后第 i 时刻振荡联络断面上第 k 条联络线的有功功率、联络线两端的相角差和有功功率的原动机机械功率, P_{ek}^{i-T} 和 θ_k^{i-T} 分别表示故障后第 $i-T$ 时刻振荡联络断面上第 k 条联络线的有功功率和联络线两端的相角差。

由图 5 可知, 等值机 A 输出的电磁功率 P_G 为:

$$P_G = \frac{E_A E_B}{X_{T1} + X_L + X_{T2}} \sin \delta \quad (1)$$

而根据图 5 所示变量间的关系有:

$$I_B X_L \cos(\varphi + \delta_1) = V_A \sin(\delta_2 - \delta_1) \quad (2)$$

则:

$$I_B \cos(\varphi + \delta_1) = \frac{V_A}{X_L} \sin(\delta_2 - \delta_1) \quad (3)$$

可得区域 A 和区域 B 之间联络线上的有功功率表达式 P_{eAB} 为:

$$\begin{aligned} P_{eAB} &= V_B I_B \cos(\varphi + \delta_1) \\ &= \frac{V_A V_B}{X_L} \sin(\delta_2 - \delta_1) \end{aligned} \quad (4)$$

其中 δ_1 、 δ_2 为线路首末端电压相角, V_A 、 V_B 为线路首末端电压幅值, X_L 为输电线路电抗。根据图 4 和图 5 可知:

$$\begin{aligned} P_{eAB} &= I_B V_B \cos(\varphi + \delta_1) = I_B E_B \cos \varphi \\ &= E_A I_B \cos(\varphi + \delta) = P_G \end{aligned} \quad (5)$$

即当忽略系统间的电阻特性时, 联络线上输送的有功功率与送端系统等值发电机在振荡过程中输出的电磁功率相等。结合式(4)可知: 振荡中心所在联络线上的有功功率与送端系统

等值发电机在暂态过程中的电磁功率具有相同的几何变化特性。

故障后第 i 时刻振荡联络断面上第 k 条联络线的母线电压相角差为：

$$\theta_k^i = \delta_{k1}^i - \delta_{k2}^i \quad (6)$$

则故障后第 i 时刻相对第 $i-T$ 时刻振荡联络断面上第 k 条联络线的母线电压相角差变化量为：

$$\Delta\theta_k^i = \theta_k^i - \theta_k^{i-T} = (\delta_{k1}^i - \delta_{k2}^i) - (\delta_{k1}^{i-T} - \delta_{k2}^{i-T}) \quad (7)$$

说明需要满足步骤 S4 中的条件 $\theta_k^i > \theta_k^{i-T}$ 时只需满足：

$$(\delta_{k1}^i - \delta_{k2}^i) - (\delta_{k1}^{i-T} - \delta_{k2}^{i-T}) > 0 \quad (8)$$

分析图 2，对送端系统 A，各联络线端口具有发电机特性，可等效为与母线相连的发电机。联络线上的有功功率，对于送端系统 A 而言具有负荷特性，可等效为与母线相连的负荷。因此，在暂态过程中的第 i 时刻，第 k 条联络线的等效电路图如图 6 所示。则等效发电机 G_k 在 i 时刻的转子运动方程为：

$$M_k \frac{d\omega_k^i}{dt} = P_{mk}^i - P_{ek}^i \quad (9)$$

式中 M_k 为等效发电机的惯性时间常数， ω_k^i 为同步坐标下的转速差，用差分代替微分有：

$$M_k \frac{\Delta\omega_k^i}{\Delta t} = M_k \frac{2\pi\Delta f_k^i}{\Delta t} = P_{mk}^i - P_{ek}^i \quad (10)$$

式中 Δf_k^i 为等效发电机 G_k 端口 i 时刻的频率变化量。由表一可知，功角失稳时 $P_{mAB} > P_{eAB}$ ，则：

$$P_{mk}^i - P_{ek}^i = M_k \frac{2\pi\Delta f_k^i}{\Delta t} > 0 \quad (11)$$

说明满足步骤 S5 中振荡联络断面上第 k 条联络线的送端母线故障后第 i 时刻的频率大于故障后第 $i-T$ 时刻的频率的条件：

$$\Delta f_k^i = f_k^i - f_k^{i-T} > 0 \quad (12)$$

时可以满足 $P_{mk}^i > P_{ek}^i$ ，即可以满足表一中暂态功角失稳的条件： $P_{mAB} > P_{eAB}$ ，式中 f_k^i 、 f_k^{i-T} 为等效发电机 G_k 在第 i 、 $i-T$ 时刻的端口频率。由于等效发电机与联络线母线直接相连，因此发电机端口频率与联络线送端母线频率相等，可根据 WAMS 量测系统实时采集得到。

综上所述，可得如下暂态功角失稳的功率-相角-频率快速判据：

$$\begin{cases} \text{(I)} P_{ek}^i - P_{ek}^{i-T} < 0 \\ \text{(II)} \theta_k^i - \theta_k^{i-T} > 0 \\ \text{(III)} f_k^i - f_k^{i-T} > 0 \end{cases} \quad (13)$$

步骤 S3 中，故障后第 i 时刻相对第 $i-T$ 时刻振荡联络断面上第 k 条联络线的有功功率变化量为：

$$\Delta P_{ek}^i = P_{ek}^i - P_{ek}^{i-T} \quad (14)$$

若满足 $\Delta P_{ek}^i = P_{ek}^i - P_{ek}^{i-T} < 0$ ，则判据条件(I)成立，执行步骤 S4；不满足 $\Delta P_{ek}^i = P_{ek}^i - P_{ek}^{i-T} < 0$ ，则执行步骤 S6。

步骤 S4 中，故障后第 i 时刻相对第 $i-T$ 时刻振荡联络断面上第 k 条联络线的母线电压相角差变化量为：

$$\Delta \theta_k^i = \theta_k^i - \theta_k^{i-T} \quad (15)$$

若满足 $\Delta \theta_k^i = \theta_k^i - \theta_k^{i-T} > 0$ ，则判据条件(II)成立，执行步骤 S5；不满足 $\Delta \theta_k^i = \theta_k^i - \theta_k^{i-T} > 0$ ，则执行步骤 S6。

步骤 S5 中，故障后第 i 时刻振荡联络断面上第 k 条联络线送端母线频率变化量为：

$$\Delta f_k^i = f_k^i - f_k^{i-T} \quad (16)$$

若满足 $\Delta f_k^i = f_k^i - f_k^{i-T} > 0$ ，则判据条件(III)成立，此时系统将发生暂态功角失稳；不满足 $\Delta f_k^i = f_k^i - f_k^{i-T} > 0$ ，则执行步骤 S6。

实施例二：

本发明提供一种基于实测响应信息的暂态功角稳定性实时判别的方法的实施例二为以某区域的多机互联电力系统的暂态功角稳定性实时判别方法实施例，该区域互联系统的网架结构示意图如图 7 所示，采用 2010 年冬季方式数据，仿真计算工具为全过程动态仿真程序 (PSD-FDS)，用仿真程序得到的扰动响应数据来模拟广域量测系统的实时量测数据。故障条件为在第 0s 时刻线路 L1 的母线 B1 侧发生三相短路故障，0.09s 跳开 B1 侧开关，0.1s 跳开 B13 侧开关，同时跳开线路 L2。监测与系统 A 相连的联络线 L3。

步骤 S1'：通过仿真程序得到的扰动响应数据来模拟广域量测系统的实时量测数据，确定振荡联络断面上的联络线，本算例中为联络线 L3。

步骤 S2'：提取反映系统振荡特性的联络断面特征信息，故障后数据从 0.1s 开始，特征量为联络线 L3 的有功功率 P_e 、母线 B2 的相角 δ_1 和母线 B3 的相角 δ_2 以及母线 B3 的频率 f 。特征变量的变化趋势如图 8、图 9 所示。

步骤 S3'：根据动态特征信息，分析联络线有功功率的变化特性，故障后第 i 时刻振荡联络断面上第 k 条联络线的有功功率变化量为：

$$\Delta P_{ek}^i = P_{ek}^i - P_{ek}^{i-T}$$

若满足 $\Delta P_{ek}^i = P_{ek}^i - P_{ek}^{i-T} < 0$ ，则判据条件(I)成立，执行步骤 S4；不满足 $\Delta P_{ek}^i = P_{ek}^i - P_{ek}^{i-T} < 0$ ，则执行步骤 S6。

由图 8 可知，在 $t = 0.42s$ 前，线路 L3 的有功功率持续增加，不满足判据条件； $t = 0.42s$

后,有功功率持续减小,判据条件成立。

步骤 S4': 故障后第 i 时刻振荡联络断面上第 k 条联络线的母线电压相角差为:

$$\theta^i = \delta_{k1}^i - \delta_{k2}^i$$

则第 i 时刻振荡联络断面上第 k 条联络线的母线电压相角差变化量为:

$$\Delta\theta^i = \theta^i - \theta^{i-T} = (\delta_{k1}^i - \delta_{k2}^i) - (\delta_{k1}^{i-T} - \delta_{k2}^{i-T})$$

若满足 $\Delta\theta^i = \theta^i - \theta^{i-T} > 0$, 则判据条件(II)成立, 执行步骤 S5; 不满足 $\Delta\theta^i = \theta^i - \theta^{i-T} > 0$, 则执行步骤 S6。

由图 8 可知, 故障后线路 L3 的相角差持续增加, 判据条件成立。

步骤 S5': 故障后第 i 时刻振荡联络断面上第 k 条联络线送端母线频率变化量为:

$$\Delta f_k^i = f_k^i - f_k^{i-T}$$

若满足 $\Delta f_k^i = f_k^i - f_k^{i-T} > 0$, 则判据条件(III)成立, 此时系统将发生暂态功角失稳; 不满足 $\Delta f_k^i = f_k^i - f_k^{i-T} > 0$, 则执行步骤 S6。

由图 9 可知, 在 $t = 0.52s$ 前, 线路 L3 的送端母线频率持续下降, 不满足判据条件; $t = 0.52s$ 后, 送端母线频率开始上升, 判据条件成立。

步骤 S6': 判断系统发生暂态功角失稳的条件缺一不可, 即条件(I)、条件(II)和条件(III)同时成立。由上述分析可知, $t = 0.52s$ 后, 判据条件均成立, 故在 $t = 0.52s$ 后, 可判断系统将发生暂态功角失稳。

以上虽然根据附图对本发明的实施例进行了详细说明, 但不仅限于此具体实施方式, 本领域的技术人员根据此具体技术方案进行的各种等同、变形处理, 也在本发明的保护范围之内。

权 利 要 求

1、一种基于实测响应信息的暂态功角稳定性实时判别的方法，判断多机互联电力系统在故障后的暂态功角稳定性，其特征在于，所述方法包括：

步骤 S1，通过 WAMS 量测系统测量的信息确定故障后所述多机互联电力系统的振荡联络断面；

步骤 S2，以 T 为采样周期通过所述 WAMS 量测系统周期性的获取能够反映所述多机互联电力系统动态特性的联络断面动态特征信息；

步骤 S3，根据所述联络断面动态特征信息，判断所述振荡联络断面上的联络线在故障后第 i 时刻的有功功率是否小于故障后第 $i-T$ 时刻的有功功率，是，执行步骤 S4，否，执行步骤 S6；

步骤 S4，根据所述联络断面动态特征信息，判断所述振荡联络断面上的联络线在故障后第 i 时刻的母线电压相角差是否大于故障后第 $i-T$ 时刻的母线电压相角差，是，执行步骤 S5，否，执行步骤 S6；

步骤 S5，根据所述联络断面动态特征信息，判断所述振荡联络断面上联络线的送端母线故障后第 i 时刻的频率是否大于故障后第 $i-T$ 时刻的频率，是，判断所述多机互联电力系统在故障后第 i 时刻将发生暂态功角失稳，否，执行步骤 S6；

步骤 S6，判断所述多机互联电力系统在故障后 i 时刻不会发生暂态功角失稳，设置 i 的值为 $i = i + T$ ，执行步骤 S1。

2、如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述步骤 S1 中，通过 WAMS 量测系统测量的信息确定故障后系统的振荡联络断面后，确定处于所述振荡联络断面上的联络线。

3、如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，当所述多机互联电力系统中有多个所述联络线有功功率发生振荡时，任意一条所述联络线上变量的变化趋势满足失稳条件时，则所述多机互联电力系统间发生振荡失稳；在所述振荡中心处于多条所述联络线的情况下，对每条所述联络线单独进行暂态功角失稳判断。

4、如权利要求 3 所述的方法，其特征在于，所述步骤 S2 中，从故障后开始通过所述 WAMS 量测系统周期性的获取能够反映多机互联电力系统动态特性的联络断面动态特征信息，所述联络断面动态特征信息的采样周期 T 与所述 WAMS 量测系统中的 PMU 测量单元的采样周期相同；

所述联络断面动态特征信息包括不同时刻振荡联络断面上不同联络线的有功功率、联络线首末端电压相角及联络线送端母线频率；其中，故障后第 i 时刻振荡联络断面上第 k 条联络线的有功功率为 P_{ek}^i ，联络线首末端电压相角分别为 δ_{k1}^i 、 δ_{k2}^i ，联络线送端母线频率为 f_k^i 。

5、如权利要求 4 所述的方法，其特征在于，所述步骤 S3 中根据所述联络断面动态特征信息，判断所述振荡联络断面上的联络线在故障后第 i 时刻的有功功率是否小于故障后第 $i-T$ 时刻的有功功率的方法为：

故障后第 i 时刻和第 $i-T$ 时刻所述振荡联络断面上第 k 条联络线的有功功率分别为 P_{ek}^i 和 P_{ek}^{i-T} ；

根据所述联络断面动态特征信息判断 $P_{ek}^i - P_{ek}^{i-T} < 0$ 时所述振荡联络断面上的所述第 k 条联络线在故障后第 i 时刻的有功功率小于故障后第 $i-T$ 时刻的有功功率。

6、如权利要求 4 所述的方法，其特征在于，所述步骤 S4 中根据所述联络断面动态特征信息，判断所述振荡联络断面上的所述联络线在故障后第 i 时刻的母线电压相角差是否大于故障后第 $i-T$ 时刻的母线电压相角差的方法为：

故障后第 i 时刻所述振荡联络断面上第 k 条联络线的母线电压相角差为： $\theta_k^i = \delta_{k1}^i - \delta_{k2}^i$ ；

所述振荡联络断面上的所述第 k 条联络线在故障后第 i 时刻的母线电压相角差 θ_k^i 与故障后第 $i-T$ 时刻的母线电压相角差 θ_k^{i-T} 的差为： $\theta_k^i - \theta_k^{i-T} = (\delta_{k1}^i - \delta_{k2}^i) - (\delta_{k1}^{i-T} - \delta_{k2}^{i-T})$ ；

根据所述联络断面动态特征信息判断 $(\delta_{k1}^i - \delta_{k2}^i) - (\delta_{k1}^{i-T} - \delta_{k2}^{i-T}) > 0$ 时所述振荡联络断面上的所述第 k 条联络线在故障后第 i 时刻的母线电压相角差大于故障后第 $i-T$ 时刻的母线电压相角差。

7、如权利要求 4 所述的方法，其特征在于，所述步骤 S5 中根据所述联络断面动态特征信息，判断所述振荡联络断面上的联络线的送端母线故障后第 i 时刻的频率是否大于故障后第 $i-T$ 时刻的频率的方法为：

故障后第 i 时刻和第 $i-T$ 时刻所述振荡联络断面上第 k 条联络线的送端母线的频率分别为 f_k^i 和 f_k^{i-T} ；

根据所述联络断面动态特征信息判断 $\Delta f_k^i = f_k^i - f_k^{i-T} > 0$ 时所述振荡联络断面上的所述第 k 条联络线在故障后第 i 时刻的送端母线的频率大于故障后第 $i-T$ 时刻的频率。

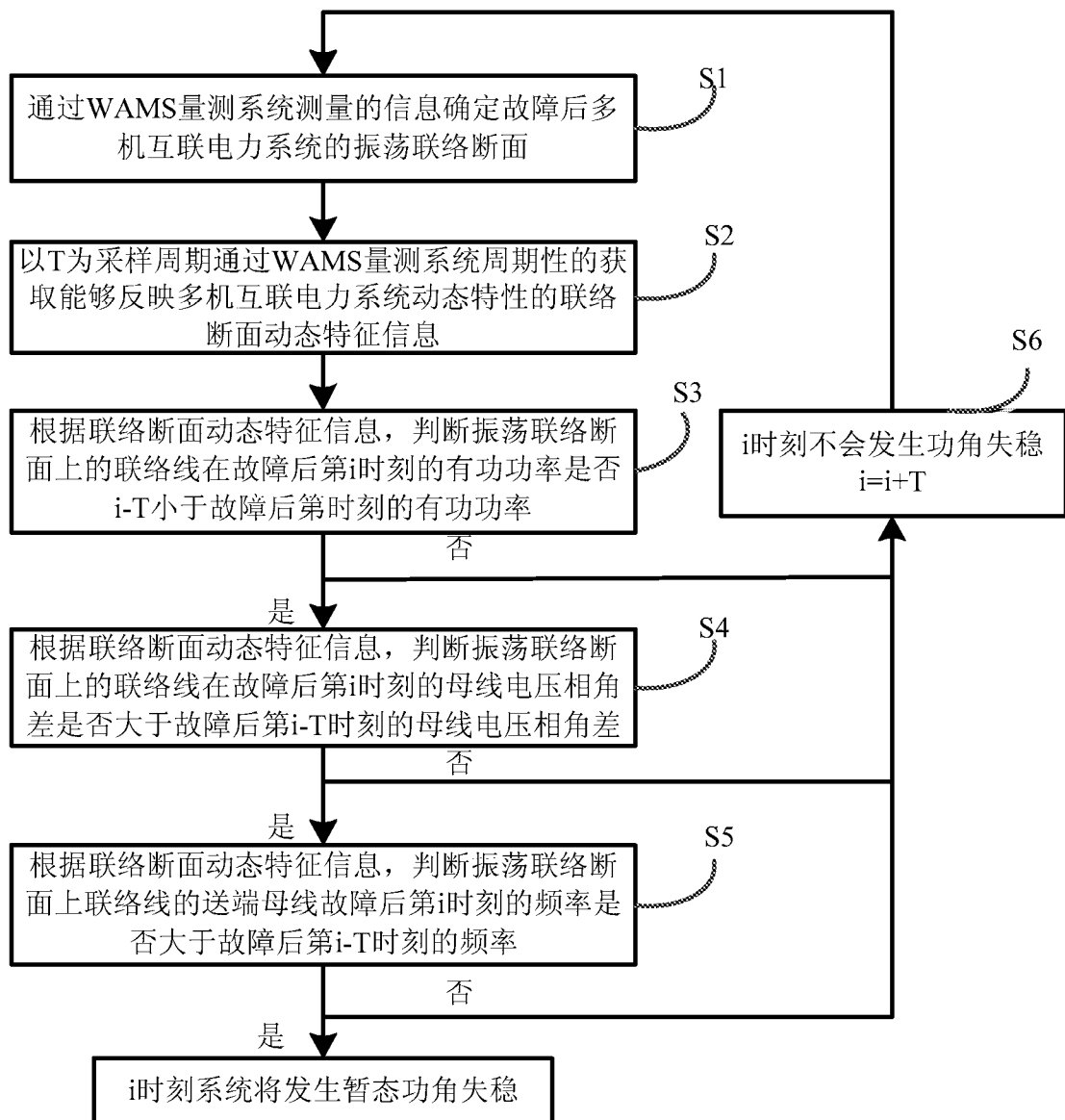


图 1

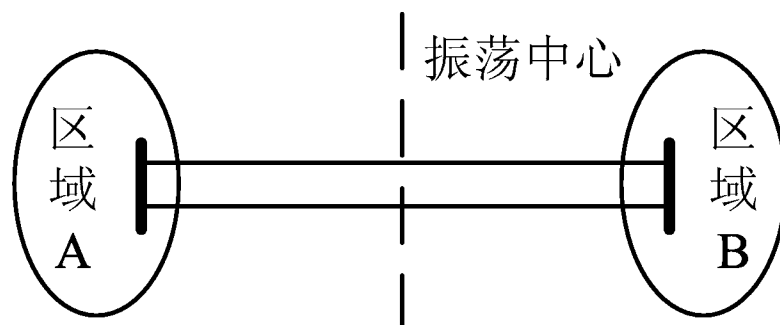


图 2

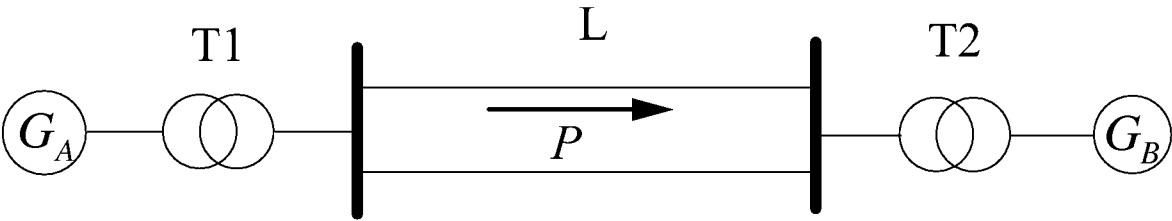


图 3

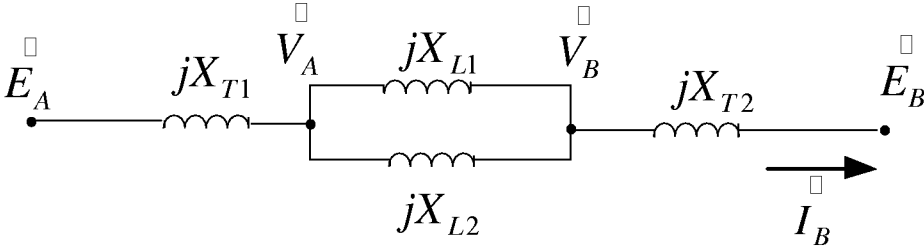


图 4

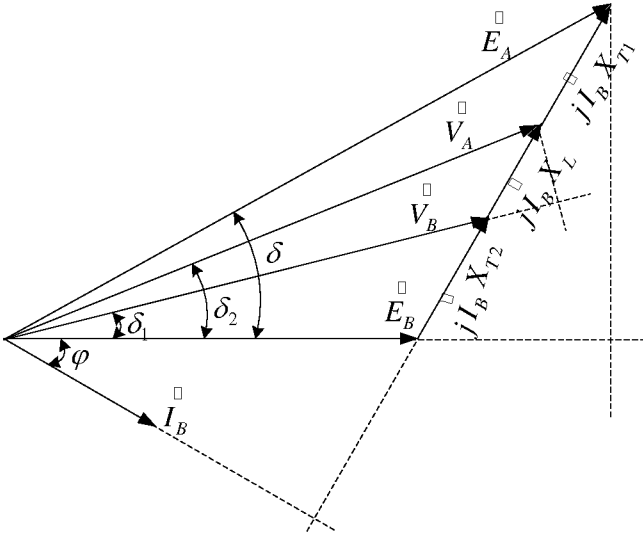


图 5

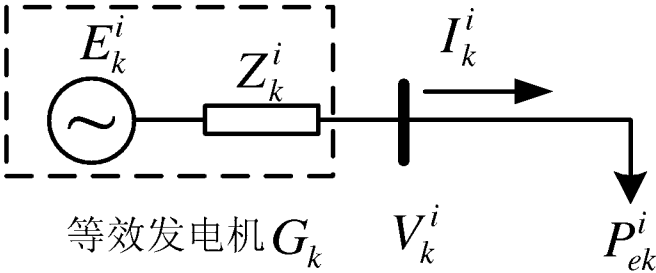


图 6

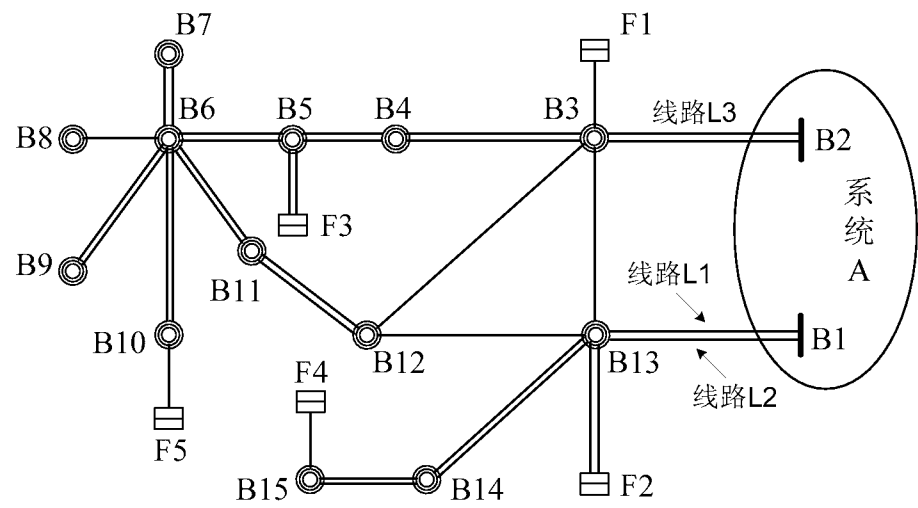


图 7

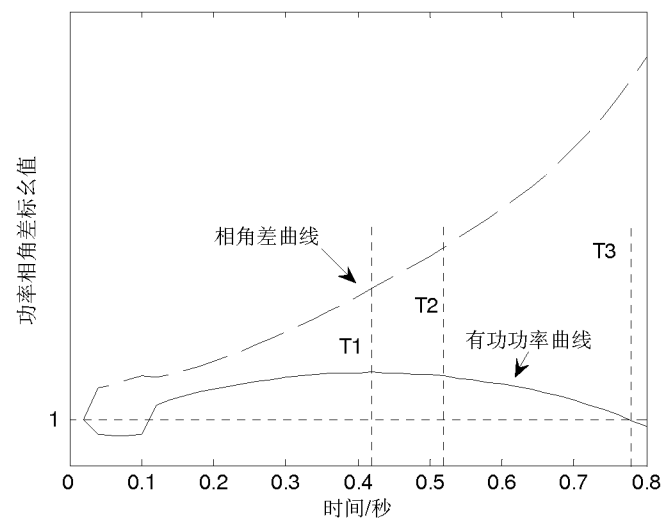


图 8

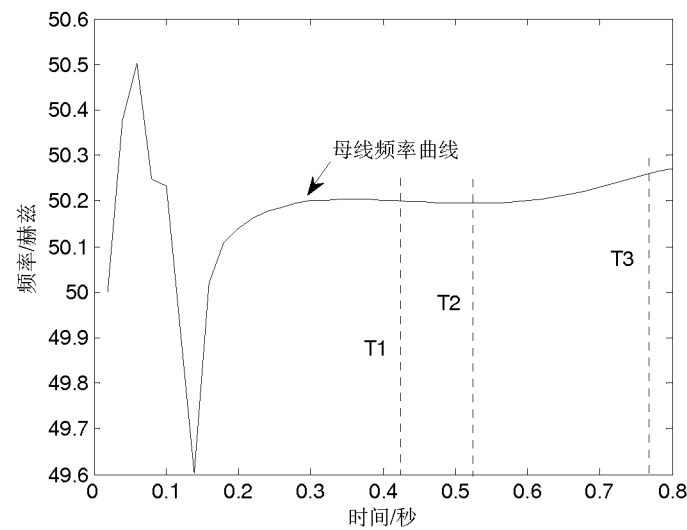


图 9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2013/087999

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02J 3/00 (2006.01) i

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: H02J

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)

CNPAT, WPI, EPODOC, CNKI:
stability, active power, phase angle, frequency, failure

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
P, X	CN 103094901 A (CHINA ELECTRIC POWER RES INST et al.) 08 May 2013 (08.05.2013) the whole document	1-7
A	CN 102684187 A (NANJING NARI CO LTD) 19 September 2012 (19.09.2012) description, paragraph [0007] to paragraph [0032], and figure 5	1-7
A	CN 102709953 A (CHINA ELECTRIC POWER RES INST et al.) 03 October 2012 (03.10.2012) 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 26 February 2014 (26.02.2014)	Date of mailing of the international search report 13 March 2014 (13.03.2014)
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 XU, Xu Telephone No. (86-10) 62411906

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2013/087999

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 103094901 A	08.05.2013	None	
CN 102684187 A	19.09.2012	None	
CN 102709953 A	03.10.2012	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2013/087999

A. 主题的分类

H02J 3/00 (2006.01) i

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: H02J

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))

CNPAT, WPI, EPODOC, CNKI:

稳定, 有功功率, 相角差, 频率, 功角, 故障, stability, active power, phase angle, frequency, failure

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
P,X	CN 103094901 A(中国电力科学研究院等) 08.5 月 2013(08.05.2013) 全文	1-7
A	CN 102684187 A(南京南瑞集团公司) 19.9 月 2012(19.09.2012) 说明书第[0007]段至第[0032]段, 附图 5	1-7
A	CN 102709953 A(中国电力科学研究院等) 03.10 月 2012(03.10.2012) 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

26.2 月 2014(26.02.2014)

国际检索报告邮寄日期

13.3 月 2014 (13.03.2014)

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

授权官员

徐旭

电话号码: (86-10) 62411906

国际检索报告

关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2013/087999

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 103094901 A	08.05.2013	无	
CN 102684187 A	19.09.2012	无	
CN 102709953 A	03.10.2012	无	