



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 10828858 A

(43)申请公布日 2018.07.17

(21)申请号 201711366554.3

(51)Int.Cl.

(22)申请日 2017.12.18

H02J 3/24(2006.01)

(71)申请人 国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院

地址 110016 辽宁省沈阳市沈河区文萃路183-1号

申请人 国家电网公司 大连理工大学

(72)发明人 刘波 王勇 穆永强 王春生 蒋理 许言路 佟永吉 朱洪波 王征 杜晓辉 曹慧杰 李卫东 晋萃萃

(74)专利代理机构 辽宁沈阳国兴知识产权代理有限公司 21100

代理人 何学军

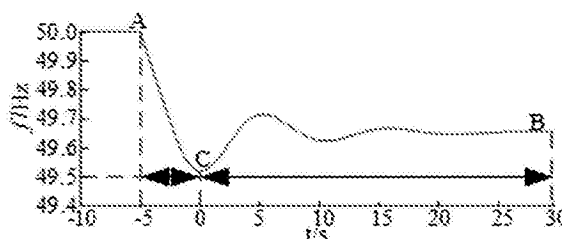
权利要求书4页 说明书9页 附图2页

(54)发明名称

主被动频率响应切换控制方法

(57)摘要

本发明涉及电力技术领域,尤其涉及一种主被动频率响应切换控制方法,具体是一种大功率缺失故障下的频率响应控制方法。本发明包括:对于一个两区域电网,用实直线代表区域间联络线,虚线代表通信线路,A区为扰动区,B区为非扰动区:第一、建立单元火电机组数学模型,第二、建立互联网数学模型。本发明实现了频率响应由分散自主控制到集中协调控制,由反馈控制到前馈控制、由校正控制到预防控制的转变,能在不增加频率响应设施的前提下,提高系统整体频率响应能力,从而提升大扰动下的频率稳定抵御能力。在大扰动下频率下降阶段有效拦截频率下降,避免系统低频减载,在频率恢复阶段使系统尽快恢复稳定,避免系统在主动控制过程中发生频率振荡。



1. 主被动频率响应切换控制方法,其特征是,包括以下步骤:

对于一个两区域电网,用实直线代表区域间联络线,虚线代表通信线路,A区为扰动区,B区为非扰动区:

第一、建立单元火电机组数学模型:

对于单元火电机组,从有功平衡角度出发,单元火电机组参与电网频率调节的建模过程包括:

①发电机负荷模块满足:

$$(P_m - P_e)g \frac{1}{2Hs + D} = \Delta f \quad (1);$$

式中: P_m 为机械功率; P_e 为电磁功率; H 为发电机惯性时间常数; D 为负荷阻尼系数;

②调速器模块满足:

$$(P_{sp} - \frac{1}{R} \Delta f_1)g \frac{1}{1 + sT_G} = \Delta P_V \quad (2);$$

式中: R 为机组调差系数; P_{sp} 为功率增量给定值; Δf_1 为机组的频率变化输入量; T_G 为调速器时间常数; ΔP_V 为蒸汽流量;

③汽轮机模块满足:

$$\Delta P_V g (F_H + \frac{1 - F_H}{1 + sT_R}) g K_m = P_m \quad (3);$$

式中: F_H 为由涡轮机产生的功率比例; T_R 为再加热时间常数; K_m 为功率转化率; P_m 为机械功率;

第二、建立互联电网数学模型:

联络线是一种导线,其将发电厂和电网联接在一起,将发电厂发出的功率输送给电网,或将电网中的功率输送回发电厂;电力系统中,称联络在线流过的功率为联络线功率 P_T ,其计算公式为:

$$P_T = \frac{|U_1| |U_2|}{X_T} \sin(\delta_{10} - \delta_{20}) \quad (4);$$

其中: U_1, U_2 :传输线两端电压;

X_T :传输线电路电抗;

δ_{10}, δ_{20} :传输线两端电压角;

从中可以看出,联络线功率的数值主要取决于两端电压的相位差角,将公式(4)进一步整理得:

$$P_T = 2\pi \frac{|U_1| |U_2|}{X_T} [\cos(\delta_{10} - \delta_{20})] (\int \Delta f_A dt - \int \Delta f_B dt) \quad (5);$$

其中: Δf_A :事故区的频率变化值;

Δf_B :支援区的频率变化值;

将式(5)进行拉氏变换可得:

$$P_T(s) = \frac{T}{s} [\Delta f_A(s) - \Delta f_B(s)] \quad (6)$$

2. 根据权利要求1所述的主被动频率响应切换控制方法,其特征是:所述扰动区,假定为A区;本地频差为 Δf_r ,控制依据参量为 c_A ;非扰动区为B区,本地频差为 Δf_l ,控制依据参量为 c_B ,则两区域控制方式为:

(1) 扰动区的控制元件;

控制启动所依据的参量可选择频差参量,即参量启动方式,可采用反馈控制进行控制,

$$c_A = \Delta f_r \quad (7);$$

(2) 非扰动区的控制元件;

由于依据扰动点频差控制对全局有利,依据本地频差控制对局部稳定有利。而且,在频率下降阶段对频率响应的要求是快速性,而在频率恢复阶段,因频率已被拦截,此时对频率响应的要求由快速性转变为准确性;所以,在频率下降阶段进行主动频率响应控制,而在频率恢复阶段进行被动频率响应控制,控制方式为:

$$c_B = \begin{cases} \Delta f_r & 0 < t \leq t_{nadir} \\ \Delta f_l & t > t_{nadir} \end{cases} \quad (8);$$

t_{nadir} 为扰动后到达频率响应最低点的时间。

3. 根据权利要求1所述的主被动频率响应切换控制方法,其特征是:所述扰动区,当大扰动下:频率波动及演变过程可大体分为两阶段,频率下降阶段和频率恢复阶段,其中 Δt_{ac} 为频率下降阶段, Δt_{cb} 为频率恢复阶段;

在频率下降阶段对频率响应的要求是快速性,而在频率恢复阶段,因频率已被拦截,此时对频率响应的要求由快速性转变为准确性。

4. 根据权利要求1所述的主被动频率响应切换控制方法,其特征是:所述电网频率,在频率稳定控制方面,电网正常运行以消除本地频差为控制目标,主要从预防和校正两个方面进行控制;其中,预防控制包含运行规划、检修计划、发电计划、在线经济调度措施,校正控制包括频率响应、自动发电控制、切机、切负荷、低频减载措施;惯性作为系统自身的性质,反应是自发行,不计入控制措施中;

在现有频率响应控制策略下,当系统发生大功率缺失故障后,所产生的功率缺额按电气距离被分配到各发电机组;由于分配速度远大于调速系统的反应速度,造成相应发电机组的机械转矩与电磁转矩瞬间失衡,转子转速降低,系统频率下降;扰动初期,系统惯性可迅速弥补功率缺额从而有效减缓初始频率下降速率,而随后的频率响应增发功率,可对频率下降实施有效拦截从而提升系统频率最低点位置,二者直接决定系统是否进行低频减载、解列;因电力系统频率响应主要由加装了调速器的发电机组实现,其控制依据是本地频率偏差,因此属于反馈控制;出于保证频率安全考虑,目前在世界各国电网运行实践中,均将频率响应作为发电机组必备的基本功能;这种频率响应控制为校正控制,属于分散控制范畴;由于其控制是在频率出现偏差后实施,故也可将其称为被动频率响应。

5. 根据权利要求1所述的主被动频率响应切换控制方法,其特征是:所述被动频率响应,故障后系统中具有频率响应能力的发电机组依据本地频差确定增减输出功率数量,消除频率波动或拦截频率大幅下降,为后续缓慢的调节手段赢取时间;当功率缺失数量较大

时,整个系统内频差时空分布特性较为明显,与远离故障点的发电机组相比,靠近故障点的机组所“感知”的频差不仅较大而且较早,使得系统内所有机组的频率响应不仅启动时刻不一样,而且所依据的频差亦不相同;其后果是,在故障发生后,靠近故障点处机组的频率响应能力发挥较为充分,而其他位置的发电机组还未发挥或只发挥出部分频率响应能力;

集中控制下,距扰动点较远机组能够依据扰动点频差动作,实现所有机组频率响应的同步控制,以快速且充分地发挥整个系统的频率响应潜力,从而更好地保证系统运行安全与稳定;在这种控制方式下,由于频率响应是依据扰动处信息,按照制定好的控制参数进行主动控制,故将这种频率响应方式称为“主动频率响应”,这种方式下的控制策略称为“主动频率响应控制策略”;

主动频率响应,控制所依据的参量可以为故障点或系统其他节点的运行参量,亦可是本地频差;大功率缺失下系统频率下降很快,为避免低频减载等事件的发生,要求频率响应控制具有快速性。而现有依据频差这一连续量为控制依据的反馈控制方式,由于需要采样、比较等环节,控制时效性较差。大功率缺失下的频率响应控制应该分秒必争,因此,可依据表示故障事件发生与否的逻辑量,采取前馈控制的方式,提高控制时效性;

无论采用前馈还是反馈控制,其控制所依据的参量均取决于当前的运行状态;因频率响应模型复杂,频率响应过程分析涉及微分方程解算,难以实现在线分析与控制,故可采用离线分析、在线应用的方式予以解决。

6. 根据权利要求1所述的主被动频率响应切换控制方法,其特征是:所述离线分析、在线应用的方式,具体包括如下:

离线分析时,首先依据被选定的频率稳定相关状态量对所有可能发生的运行状态进行聚类,形成若干典型场景,然后利用有关分析方法对上述典型场景进行分析,确定每类场景应采取的主动频率响应控制策略,形成控制决策表;控制决策表是控制策略的具体实施方案;在线应用中,先将当前运行状态进行场景归属辨识,确定其场景归属,随后依据当前状态与所属场景的偏差进行灵敏度分析,对归属场景的控制决策表进行修正,从而得到当前运行状态下的主动频率响应控制策略;若当前运行状态下发生故障,则依据所得到的主动控制策略进行频率响应控制,若运行正常,则进行下一个运行方式的分析,重复上述过程。

7. 根据权利要求1所述的主被动频率响应切换控制方法,其特征是:所述两区域电网,用实直线代表区域间联络线,虚线代表通信线路,A区为扰动区,B区为非扰动区,两区域控制方式如下:

假定扰动区本地频差为 Δf_r ,到达最低点时间为 t_{nadir} ,控制依据参量为 c_A ,非扰动区本地频差为 Δf_1 ,控制依据参量为 c_B ,则“主被动频率响应切换控制方法”下两区域控制方式为:

(1) 扰动区的控制元件:

控制启动所依据的参量可选择频差参量,即参量启动方式,采用反馈控制进行控制, $c_A = \Delta f_r$;

(2) 非扰动区的控制元件:

因在频率下降阶段对频率响应的要求是快速性,而在频率恢复阶段的控制要求为准确性,故在频率下降阶段可采用主动频率响应,而在频率恢复阶段采用传统的被动控制方式,即主被动频率响应切换控制方法,以适应不同运行阶段控制目标的差异;

$$c_B = \begin{cases} \Delta f_l & 0 < t \leq t_{nadir} \\ \Delta f_r & t > t_{nadir} \end{cases}$$

上述式中：本地频差为 Δf_r ，到达最低点时间为 t_{nadir} ，控制依据参量为 c_A ，非扰动区本地频差为 Δf_l ，控制依据参量为 c_B 。

主被动频率响应切换控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及电力技术领域,尤其涉及一种主被动频率响应切换控制方法,具体是一种大功率缺失故障下的频率响应控制方法。

背景技术

[0002] 特高压输电工程逐步推进导致单一元件故障所造成功率失衡数量不断增加、可再生能源大规模接入导致常规机组容量占比持续降低,频率响应攻防两端此消彼长,已有理论已经不能满足分析需要,频率响应理论应该精细化,应该与时俱进。

[0003] 电网正常运行以消除本地频差为控制目标,主要从预防和校正两个方面进行控制。为保证整个电网运行安全和运行品质,频率响应被设置为跨区无偿相互支援的功能,是所有发电单元必备的输电辅助服务,其控制模式为依据本地频差的分散自主控制,虽系统的频率响应能力是所有发电机组频率响应能力的综合,但各发电机组间频率响应的不同步,会降低频率响应的整体作用效果。

[0004] 大扰动下最受关注的是频率波动的最低点,因其决定低频减载的启动与否。从扰动发生到频率下降至最低点时间短暂,一般以秒计。频率响应的作用是在系统经受大功率扰动下频率快速下降时段迅速补充功率缺失,对频率下降实施有效拦截,在避免低频减载启动的同时,为后续缓慢调节手段的投入赢得时间。由于扰动后频率快速下降时间短暂,在此期间若能提高频率响应的执行速度,可极大地改变频率波动暂态过程,避免低频减载的发生。

[0005] 针对大功率缺失下系统频率响应能力下降这一现状,需在现有频率响应设施的基础上,提出一种控制策略,用于在系统频率快速下降阶段进行有效拦截,以避免低频减载,增强系统抵御风险的能力。

发明内容

[0006] 针对上述现有技术中存在的问题,本发明提供一种主被动频率响应切换控制方法,其目的是为了提出一种能够在特高压背景下,有效拦截频率响应初始下降过程,抬高频率响应最低点位置,以增强系统频率响应抵御能力,避免低频减载。

[0007] 为了达到上述发明目的,本发明是通过以下方式实现的:

[0008] 主被动频率响应切换控制方法,包括以下步骤:

[0009] 对于一个两区域电网,用实直线代表区域间联络线,虚线代表通信线路,A区为扰动区,B区为非扰动区:

[0010] 第一、建立单元火电机组数学模型:

[0011] 对于单元火电机组,从有功平衡角度出发,单元火电机组参与电网频率调节的建模过程包括:

[0012] ①发电机负荷模块满足:

$$[0013] \quad (P_m - P_e)g \frac{1}{2Hs + D} = \Delta f \quad (1);$$

[0014] 式中： P_m 为机械频率； P_e 为电磁频率； H 为发电机惯性时间常数； D 为负荷阻尼系数；

[0015] ②调速器模块满足：

$$[0016] \quad (P_{sp} - \frac{1}{R} \Delta f_1)g \frac{1}{1 + sT_G} = \Delta P_V \quad (2);$$

[0017] 式中： R 为机组调差系数； P_{sp} 为功率增量给定值； Δf_1 为机组的频率变化输入量； T_G 为调速器时间常数； ΔP_V 为蒸汽流量；

[0018] ③汽轮机模块满足：

$$[0019] \quad \Delta P_V g (F_H + \frac{1 - F_H}{1 + sT_R}) g K_m = P_m \quad (3);$$

[0020] 式中： F_H 为由涡轮机产生的功率比例； T_R 为再加热时间常数； K_m 为功率转化率； P_m 为机械功率；

[0021] 第二、建立互联电网数学模型：

[0022] 联络线是一种导线，其将发电厂和电网联接在一起，将发电厂发出的功率输送给电网，或将电网中的功率输送回发电厂；电力系统中，称联络在线流过的功率为联络线功率 P_T ，其计算公式为：

$$[0023] \quad P_T = \frac{|U_1| |U_2|}{X_T} \sin(\delta_{10} - \delta_{20}) \quad (4);$$

[0024] 其中： U_1, U_2 ：传输线两端电压；

[0025] X_T ：传输线电路电抗；

[0026] δ_{10}, δ_{20} ：传输线两端电压角；

[0027] 从中可以看出，联络线功率的数值主要取决于两端电压的相位差角，将公式（4）进一步整理得：

$$[0028] \quad P_T = 2\pi \frac{|U_1| |U_2|}{X_T} [\cos(\delta_{10} - \delta_{20})] (\int \Delta f_A dt - \int \Delta f_B dt) \quad (5);$$

[0029] 其中： Δf_A ：事故区的频率变化值；

[0030] Δf_B ：支援区的频率变化值；

[0031] 将式（5）进行拉氏变换可得：

$$[0032] \quad P_T(s) = \frac{T}{s} [\Delta f_A(s) - \Delta f_B(s)] \quad (6);$$

[0033] 所述扰动区，假定为A区；本地频差为 Δf_r ，控制依据参量为 c_A ；非扰动区为B区，本地频差为 Δf_1 ，控制依据参量为 c_B ，则两区域控制方式为：

[0034] (1) 扰动区的控制元件；

[0035] 控制启动所依据的参量可选择频差参量，即参量启动方式，可采用反馈控制进行控制，

[0036] $c_A = \Delta f_r$ (7);

[0037] (2) 非扰动区的控制元件;

[0038] 由于依据扰动点频差控制对全局有利,依据本地频差控制对局部稳定有利。而且,在频率下降阶段对频率响应的要求是快速性,而在频率恢复阶段,因频率已被拦截,此时对频率响应的要求由快速性转变为准确性;所以,在频率下降阶段进行主动频率响应控制,而在频率恢复阶段进行被动频率响应控制,控制方式为:

$$[0039] \quad c_B = \begin{cases} \Delta f_r & 0 < t \leq t_{nadir} \\ \Delta f_l & t > t_{nadir} \end{cases} \quad (8);$$

[0040] t_{nadir} 为扰动后到达频率响应最低点的时间。

[0041] 所述扰动区,当大扰动下:频率波动及演变过程可大体分为两阶段,频率下降阶段和频率恢复阶段,其中 Δt_{AC} 为频率下降阶段, Δt_{CB} 为频率恢复阶段;

[0042] 在频率下降阶段对频率响应的要求是快速性,而在频率恢复阶段,因频率已被拦截,此时对频率响应的要求由快速性转变为准确性。

[0043] 所述电网频率,在频率稳定控制方面,电网正常运行以消除本地频差为控制目标,主要从预防和校正两个方面进行控制;其中,预防控制包含运行规划、检修计划、发电计划、在线经济调度措施,校正控制包括频率响应、自动发电控制、切机、切负荷、低频减载措施;惯性作为系统自身的性质,反应是自发行,不计入控制措施中;

[0044] 在现有频率响应控制策略下,当系统发生大功率缺失故障后,所产生的功率缺额按电气距离被分配到各发电机组;由于分配速度远大于调速系统的反应速度,造成相应发电机组的机械转矩与电磁转矩瞬间失衡,转子转速降低,系统频率下降;扰动初期,系统惯性可迅速弥补功率缺额从而有效减缓初始频率下降速率,而随后的频率响应增发功率,可对频率下降实施有效拦截从而提升系统频率最低点位置,二者直接决定系统是否进行低频减载、解列;因电力系统频率响应主要由加装了调速器的发电机组实现,其控制依据是本地频率偏差,因此属于反馈控制;出于保证频率安全考虑,目前在世界各国电网运行实践中,均将频率响应作为发电机组必备的基本功能;这种频率响应控制为校正控制,属于分散控制范畴;由于其控制是在频率出现偏差后实施,故也可将其称为被动频率响应。

[0045] 所述被动频率响应,故障后系统中具有频率响应能力的发电机组依据本地频差确定增减输出功率数量,消除频率波动或拦截频率大幅下降,为后续缓慢的调节手段赢取时间;

[0046] 当功率缺失数量较大时,整个系统内频差时空分布特性较为明显,与远离故障点的发电机组相比,靠近故障点的机组所“感知”的频差不仅较大而且较早,使得系统内所有机组的频率响应不仅启动时刻不一样,而且所依据的频差亦不相同;其后果是,在故障发生后,靠近故障点处机组的频率响应能力发挥较为充分,而其他位置的发电机组还未发挥或只发挥出部分频率响应能力;

[0047] 集中控制下,距扰动点较远机组能够依据扰动点频差动作,实现所有机组频率响应的同步控制,以快速且充分地发挥整个系统的频率响应潜力,从而更好地保证系统运行安全与稳定;在这种控制方式下,由于频率响应是依据扰动处信息,按照制定好的的控制参数进行主动控制,故将这种频率响应方式称为“主动频率响应”,这种方式下的控制策略

称为“主动频率响应控制策略”；

[0048] 主动频率响应,控制所依据的参量可以为故障点或系统其他节点的运行参量,亦可是本地频差;大功率缺失下系统频率下降很快,为避免低频减载等事件的发生,要求频率响应控制具有快速性。而现有依据频差这一连续量为控制依据的反馈控制方式,由于需要采样、比较等环节,控制时效性较差。大功率缺失下的频率响应控制应该分秒必争,因此,可依据表示故障事件发生与否的逻辑量,采取前馈控制的方式,提高控制时效性;

[0049] 无论采用前馈还是反馈控制,其控制所依据的参量均取决于当前的运行状态;因频率响应模型复杂,频率响应过程分析涉及微分方程解算,难以实现在线分析与控制,故可采用离线分析、在线应用的方式予以解决。

[0050] 所述离线分析、在线应用的方式,具体包括如下:离线分析时,首先依据被选定的频率稳定相关状态量对所有可能发生的运行状态进行聚类,形成若干典型场景,然后利用有关分析方法对上述典型场景进行分析,确定每类场景应采取的主动频率响应控制策略,形成控制决策表;控制决策表是控制策略的具体实施方案;在线应用中,先将当前运行状态进行场景归属辨识,确定其场景归属,随后依据当前状态与所属场景的偏差进行灵敏度分析,对归属场景的控制决策表进行修正,从而得到当前运行状态下的主动频率响应控制策略;若当前运行状态下发生故障,则依据所得到的主动控制策略进行频率响应控制,若运行正常,则进行下一个运行方式的分析,重复上述过程。

[0051] 所述两区域电网,用实直线代表区域间联络线,虚线代表通信线路,A区为扰动区,B区为非扰动区,两区域控制方式如下:假定扰动区本地频差为 Δf_r ,到达最低点时间为 t_{nadir} ,控制依据参量为 c_A ,非扰动区本地频差为 Δf_l ,控制依据参量为 c_B ,则“主被动频率响应切换控制方法”下两区域控制方式为:

[0052] (1) 扰动区的控制元件:

[0053] 控制启动所依据的参量可选择频差参量,即参量启动方式,采用反馈控制进行控制, $c_A = \Delta f_r$;

[0054] (2) 非扰动区的控制元件:

[0055] 因在频率下降阶段对频率响应的要求是快速性,而在频率恢复阶段的控制要求为准确性,故在频率下降阶段可采用主动频率响应,而在频率恢复阶段采用传统的被动控制方式,即主被动频率响应切换控制方法,以适应不同运行阶段控制目标的差异;

$$[0056] \quad c_B = \begin{cases} \Delta f_l & 0 < t \leq t_{nadir} \\ \Delta f_r & t > t_{nadir} \end{cases}$$

[0057] 上述式中:本地频差为 Δf_r ,到达最低点时间为 t_{nadir} ,控制依据参量为 c_A ,非扰动区本地频差为 Δf_l ,控制依据参量为 c_B 。

[0058] 本发明由于采用以上技术方案,具有以下优点:

[0059] 1、所提出的控制策略实现了频率响应由分散自主控制到集中协调控制,由反馈控制到前馈控制、由校正控制到预防控制的转变,能够在不增加频率响应设施的前提下,提高系统整体频率响应能力,从而提升大扰动下的频率稳定抵御能力。

[0060] 2、所提出的控制策略既能在大扰动下频率下降阶段有效拦截频率下降,避免系统低频减载,在频率恢复阶段使系统尽快恢复稳定,避免系统在主动控制过程中发生频率

振荡。

[0061] 下面结合附图和具体实施例,对本发明做进一步详细的描述,但不受本实施例所限。

附图说明

- [0062] 图1是本发明频率响应动态过程图;
 [0063] 图2是本发明两区域电网结构图;
 [0064] 图3是本发明频率变化过程图;
 [0065] 图4是本发明两区域互联电网模型框图。

具体实施方式

[0066] 本发明提供一种主被动频率响应切换控制方法,能够在特高压背景下,有效提高频率响应最低点位置,避免系统低频减载,并同时保证系统稳定的控制策略。

[0067] 本发明方法包括以下步骤:

[0068] 对于一个两区域电网,用实直线代表区域间联络线,虚线代表通信线路,A区为扰动区,B区为非扰动区,具体如图2示。其中“主被动频率响应切换控制方法”下两区域控制方式如下:

[0069] 第一、建立单元火电机组数学模型。

[0070] 对于单元火电机组,从有功平衡角度出发,单元火电机组参与电网频率调节的建模过程包括:

[0071] ①发电机负荷模块满足:

$$[0072] \quad (P_m - P_e)g \frac{1}{2Hs + D} = \Delta f \quad (1);$$

[0073] 式中: P_m 为机械频率; P_e 为电磁频率; H 为发电机惯性时间常数; D 为负荷阻尼系数。

[0074] ②调速器模块满足:

$$[0075] \quad (P_{sp} - \frac{1}{R} \Delta f_1)g \frac{1}{1 + sT_G} = \Delta P_V \quad (2);$$

[0076] 式中: R 为机组调差系数; P_{sp} 为功率增量给定值; Δf_1 为机组的频率变化输入量; T_G 为调速器时间常数; ΔP_V 为蒸汽流量。

[0077] ③汽轮机模块满足:

$$[0078] \quad \Delta P_V g (F_H + \frac{1 - F_H}{1 + sT_R}) g K_m = P_m \quad (3);$$

[0079] 式中: F_H 为由涡轮机产生的功率比例; T_R 为再加热时间常数; K_m 为功率转化率; P_m 为机械功率。

[0080] 第二、建立互联电网数学模型。

[0081] 联络线是一种专用导线,其将发电厂和电网联接在一起,可以将发电厂发出的功率输送给电网,也可以将电网中的功率输送回发电厂。电力系统中,称联络在线流过的功

率为联络线功率 P_T ,其计算公式为:

$$[0082] \quad P_T = \frac{|U_1| |U_2|}{X_T} \sin(\delta_{10} - \delta_{20}) \quad (4);$$

[0083] 其中: U_1, U_2 :传输线两端电压;

[0084] X_T :传输线电路电抗;

[0085] δ_{10}, δ_{20} :传输线两端电压角。

[0086] 从中可以看出,联络线功率的数值主要取决于两端电压的相位差角,将公式 (4) 进一步整理得:

$$[0087] \quad P_T = 2\pi \frac{|U_1| |U_2|}{X_T} [\cos(\delta_{10} - \delta_{20})] \left(\int \Delta f_A dt - \int \Delta f_B dt \right) \quad (5);$$

[0088] 其中: Δf_A :事故区的频率变化值;

[0089] Δf_B :支援区的频率变化值。

[0090] 将式 (5) 进行拉氏变换可得:

$$[0091] \quad P_T(s) = \frac{T}{s} [\Delta f_A(s) - \Delta f_B(s)] \quad (6);$$

[0092] 因此,两区域互联电网仿真模型框图如图4所示,图4是两区域互联电网 模型框图。

[0093] 本发明控制策略实施时:

[0094] 在主被动频率响应切换控制方法下,假定扰动区为A区,本地频差为 Δf_r ,控制依据参量为 c_A ;非扰动区为B区,本地频差为 Δf_l ,控制依据参量为 c_B ,则 两区域控制方式为:

[0095] (1) 扰动区的控制元件。

[0096] 控制启动所依据的参量可选择频差参量,即参量启动方式,可采用反馈控制 进行控制,

$$[0097] \quad c_A = \Delta f_r \quad (7);$$

[0098] (2) 非扰动区的控制元件。

[0099] 由于依据扰动点频差控制对全局有利,依据本地频差控制对局部稳定有利。而且,在频率下降阶段对频率响应的要求是快速性,而在频率恢复阶段,因频率 已被拦截,此时对频率响应的要求由快速性转变为准确性。所以,在频率下降阶 段进行主动频率响应控制,而在频率恢复阶段进行被动频率响应控制,控制方式 为:

$$[0100] \quad c_B = \begin{cases} \Delta f_r & 0 < t \leq t_{nadir} \\ \Delta f_l & t > t_{nadir} \end{cases} \quad (8);$$

[0101] t_{nadir} 为扰动后到达频率响应最低点的时间。

[0102] 在有功功率平衡控制,即频率稳定控制方面,电网正常运行以消除本地频差 为控制目标,主要从预防和校正两个方面进行控制。其中,预防控制包含运行规 划、检修计划、发电计划、在线经济调度措施,校正控制包括频率响应、自动发 电控制、切机、切负荷、低频减载措施。惯性作为系统自身的性质,反应是自发 行为,不计入控制措施中。

[0103] 在现有频率响应控制策略下,当系统发生大功率缺失故障后,所产生的功率缺额按电气距离被分配到各发电机组。由于分配速度远大于调速系统的反应速度,造成相应发电机组的机械转矩与电磁转矩瞬间失衡,转子转速降低,系统频率下降。扰动初期,系统惯性可迅速弥补功率缺额从而有效减缓初始频率下降速率,而随后的频率响应增发功率,可对频率下降实施有效拦截从而提升系统频率最低点位置,二者直接决定系统是否进行低频减载、解列等。因电力系统频率响应主要由加装了调速器的发电机组实现,其控制依据是本地频率偏差,因此属于反馈控制。出于保证频率安全考虑,目前在世界各国电网运行实践中,均将频率响应作为发电机组必备的基本功能。这种频率响应控制为校正控制,属于分散控制范畴。由于其控制是在频率出现偏差后实施,故也可将其称为“被动频率响应”。

[0104] 在被动频率响应控制策略下,故障后系统中具有频率响应能力的发电机组依据本地频差确定增减输出功率数量,消除频率波动或拦截频率大幅下降,为后续缓慢的调节手段赢取时间,从而保证系统运行安全。但是当系统规模大造成频率时空分布特性较为显著时,该策略的实施效果具有一定的局限性。

[0105] 当功率缺失数量较大时,整个系统内频差时空分布特性较为明显,与远离故障点的发电机组相比,靠近故障点的机组所“感知”的频差不仅较大而且较早,使得系统内所有机组的频率响应不仅启动时刻不一样,而且所依据的频差亦不相同。其后果是,在故障发生后,靠近故障点处机组的频率响应能力发挥较为充分,而其他位置的发电机组还未发挥或只发挥出部分频率响应能力。

[0106] 系统的频率响应能力是所有发电机组频率响应能力的综合。目前被普遍采用的被动频率响应方式,会导致系统内所有发电机组的频率响应不能迅速同步启动并发挥预期能力,造成系统的频率响应能力难以充分发挥。若能采取措施使得系统内所有机组同步且快速响应,则可有效发挥系统内机组的频率响应能力,提升故障后频率最低点,提高频率稳定性,从而避免低频减载和解列事故的发生,保证系统运行的安全与稳定。

[0107] 传统的频率响应控制由于只需要本地信号,因此对通信条件要求不高。而主动频率响应控制由于需要将外地(相距可长达数千公里)参量通过信道传输到本地,因此对通信条件提出了更高的要求。随着电网通信技术的发展,基于同步相量测量单元(phasor measurement unit-PMU)的广域测量系统(wide area measurement system-WAMS),不仅能提供高密度精准频率采样数据,还能实现频差信号的远距离实时传播,这些为发电机组频率响应实现由分散控制到集中控制的转变提供技术基础。

[0108] 集中控制下,距扰动点较远机组能够依据扰动点频差动作,实现所有机组频率响应的同步控制,以快速且充分地发挥整个系统的频率响应潜力,从而更好地保证系统运行安全与稳定。在这种控制方式下,由于频率响应是依据扰动处信息,按照制定好的的控制参数进行主动控制,故将这种频率响应方式称为“主动频率响应”,这种方式下的控制策略称为“主动频率响应控制策略”。

[0109] 主动频率响应,控制所依据的参量可以为故障点或系统其他节点的运行参量,亦可是本地频差。大功率缺失下系统频率下降很快,为避免低频减载等事件的发生,要求频率响应控制具有快速性。而现有依据频差这一连续量为控制依据的反馈控制方式,由于需要采样、比较等环节,控制时效性较差。大功率缺失下的频率响应控制应该分秒必争,因

此,可依据表示故障事件发生与否的逻辑量,采取前馈控制的方式,提高控制时效性。

[0110] 显然,依据本地量控制仅考虑局部区域系统稳定问题,而依据外地量控制可计及系统频差时空分布特性,能够从全局出发考虑整个系统的频率稳定性问题。

[0111] 依据本地量的反馈控制在扰动引起被控量偏差后才开始动作,动作不及时,但其控制方式为闭环控制,能够消除多种扰动对被控变量的影响;而依据外地量的前馈控制可在扰动发生后偏差出现前及时动作,能够抑制被控量由扰动引起的偏差,但该控制具有指定性补偿的局限性,通常一种前馈作用只能克服一种干扰,且由于控制输出不会对系统控制进行反馈,系统抗扰动性差。

[0112] 大扰动下的频率波动及演变过程可大体分为两阶段:频率下降阶段和频率恢复阶段。如图1所示,图1是本发明频率响应动态过程图。其中 Δt_{AC} 为频率下降阶段, Δt_{CB} 为频率恢复阶段。

[0113] 在系统运行频率演变过程的不同阶段,对频率响应控制的要求亦不相同。在频率下降阶段对频率响应的要求是快速性,而在频率恢复阶段,因频率已被拦截,此时对频率响应的要求由快速性转变为准确性。

[0114] 但是倘若非扰动区域控制元件依据扰动点参量实施主动频率响应控制,则会造成非扰动点控制元件控制行为与本地控制目标相互矛盾,这不仅会加剧系统频率振荡,延长其恢复至稳态的时间,严重情况下,特别是频率下降阶段,还可能会导致频差越上限,引起新的频率稳定问题。因此,将常规频率响应控制策略与主动频率响应控制策略结合起来,提出一种新的控制策略——“主被动频率响应切换控制方法”。

[0115] 无论采用前馈还是反馈控制,其控制所依据的参量均取决于当前的运行状态。因频率响应模型复杂,频率响应过程分析涉及微分方程解算,难以实现在线分析与控制,故可采用离线分析、在线应用的方式予以解决。具体方案如下:

[0116] 离线分析时,首先依据被选定的频率稳定相关状态量对所有可能发生的运行状态进行聚类,形成若干典型场景,然后利用有关分析方法对上述典型场景进行分析,确定每类场景应采取的主动频率响应控制策略,形成控制决策表。控制决策表是控制策略的具体实施方案。在线应用中,先将当前运行状态进行场景归属辨识,确定其场景归属,随后依据当前状态与所属场景的偏差进行灵敏度分析,对归属场景的控制决策表进行修正,从而得到当前运行状态下的主动频率响应控制策略;若当前运行状态下发生故障,则依据所得到的主动控制策略进行频率响应控制,若运行正常,则进行下一个运行方式的分析,重复上述过程。

[0117] 对于一个两区域电网,用实直线代表区域间联络线,虚线代表通信线路,A区为扰动区,B区为非扰动区,具体如图2示,图2是本发明两区域电网结构图。其中“主被动频率响应切换控制方法”下两区域控制方式如下:

[0118] 假定扰动区本地频差为 Δf_r ,到达最低点时间为 t_{nadir} ,控制依据参量为 c_A ,非扰动区本地频差为 Δf_1 ,控制依据参量为 c_B ,则“主被动频率响应切换控制方法”下两区域控制方式为:

[0119] 1) 扰动区的控制元件:

[0120] 控制启动所依据的参量可选择频差参量,即参量启动方式,可采用反馈控制进行控制, $c_A = \Delta f_r$;

[0121] 2) 非扰动区的控制元件:

[0122] 因在频率下降阶段对频率响应的要求是快速性,而在频率恢复阶段的控制要求为准确性,故在频率下降阶段可采用主动频率响应,而在频率恢复阶段采用传统的被动控制方式,即主被动频率响应切换控制方法,以适应不同运行阶段控制目标的差异。

$$[0123] \quad c_B = \begin{cases} \Delta f_l & 0 < t \leq t_{nadir} \\ \Delta f_r & t > t_{nadir} \end{cases}$$

[0124] 上述式中:本地频差为 Δf_r ,到达最低点时间为 t_{nadir} ,控制依据参量为 c_A ,非扰动区本地频差为 Δf_l ,控制依据参量为 c_B 。

[0125] 对于某具体仿真系统,采用“主被动频率响应切换控制方法”进行控制,系统仿真结果如下图3所示,图3是本发明频率变化过程图。

[0126] 需要说明的是,以上实施例不以任何形式限制本发明,凡采用等同替换或者等效变换、改进等方式所获得的技术方案,均落在本发明的保护范围内。

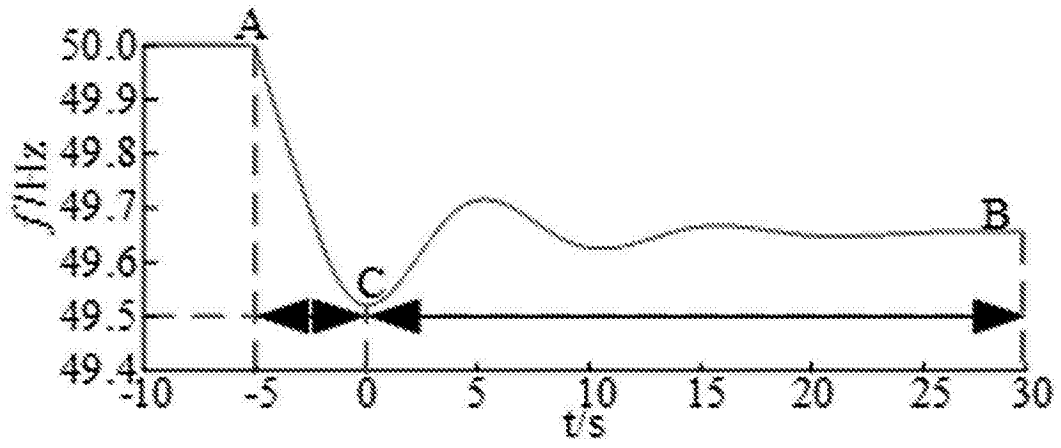


图1

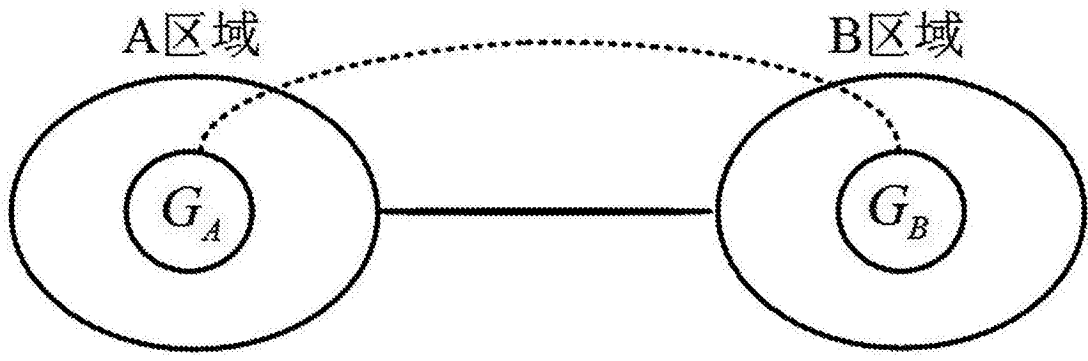


图2

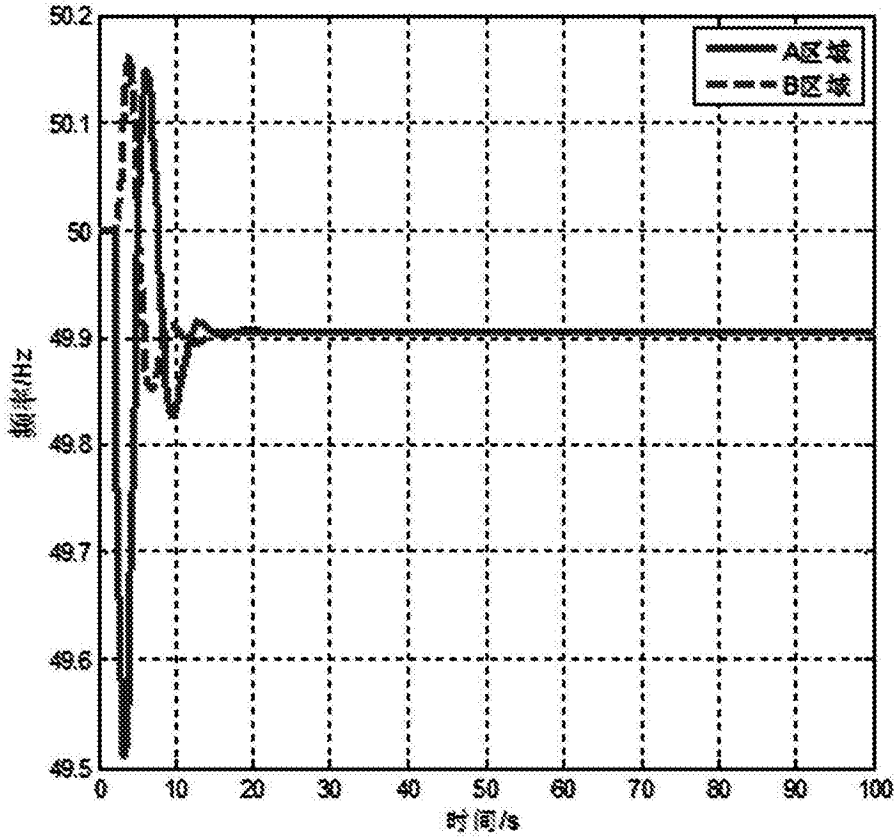


图3

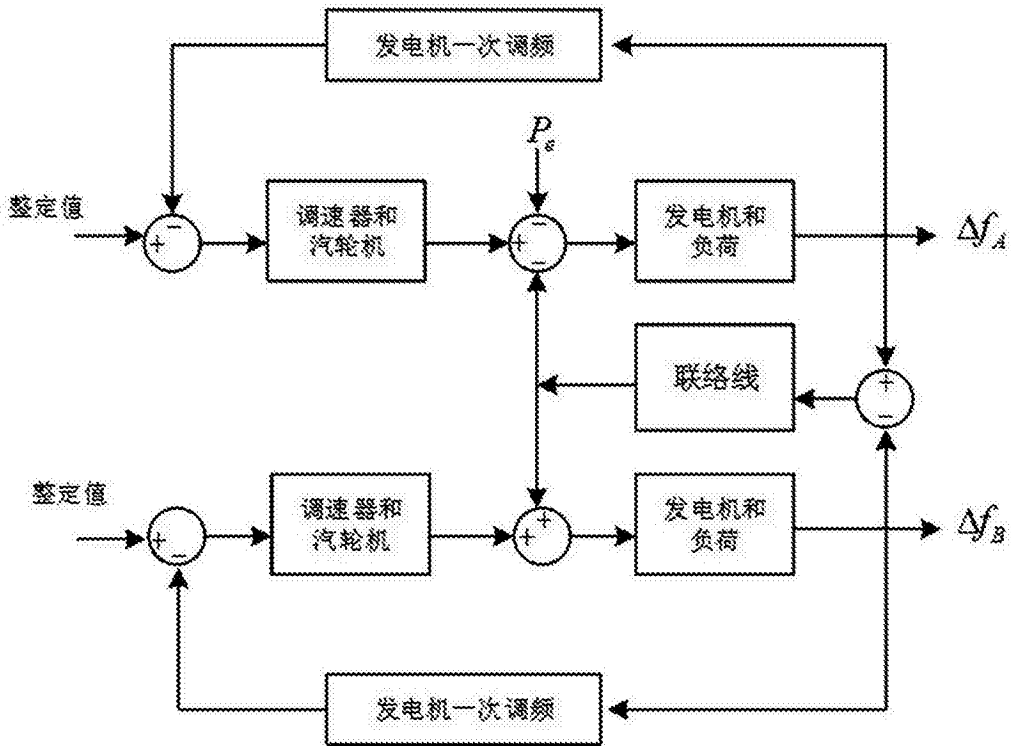


图4