

基于能量变化的暂态频率安全紧急控制决策方法研究

李碧君^{1,2}, 李兆伟^{1,2}, 吴雪莲^{1,2}, 刘福锁^{1,2}, 李威^{1,2}

(1. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211006;

2. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 211006)

摘要: 从能量变化的视角, 研究频率安全紧急控制决策问题。基于系统整体频率特性与系统等值同步发电机转子动能的关系, 将频率安全约束转化为对系统等值同步发电机转子动能的约束。基于系统等值同步发电机转子动能变化与不平衡功率累积能量的关联, 分析频率安全控制机理。研究通过控制不平衡功率累积能量实现频率安全控制目标的控制决策方法, 将以往通过控制不平衡功率, 转化为暂态过程的能量控制, 从而使控制决策更为灵活。通过实际电网数据仿真验证方法的正确性。

关键词: 频率安全; 紧急控制决策; 等值发电机转子动能; 不平衡功率

Research on the decision method of frequency security emergency control based on energy change

LI Bijun^{1,2}, LI Zhaowei^{1,2}, WU Xuelian^{1,2}, LIU Fusuo^{1,2}, LI Wei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211006, China;

2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211006, China)

Abstract: From the view of energy change, the decision method of frequency security emergency control is studied. Based on the relationship between the frequency change and the change of kinetic energy stored in the rotating masses of the synchronous motor, the frequency security constraint is changed into the constraint of the kinetic energy stored in the rotating masses of the synchronous. And then, based on the relationship between the variation of kinetic energy stored in the rotating masses of the synchronous motor and the energy accumulated by imbalance power of power system, the mechanism of frequency security emergency control is studied. The energy accumulated by imbalance power is controlled to achieve frequency security control objectives. Therefore, controlling imbalance power in the traditional method can be replaced by controlling energy during the dynamic frequency variation process. The flexibility of frequency security emergency control decision is dramatically increased. By simulation analysis of the real power system, the conclusion is evaluated.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Research on Grid-Source Coordination Frequency Stability Control Techniques of Multi-DC/AC Transmission System in Large-scale Energy Base".

Key words: frequency security; emergency control decision; rotating masses of synchronous motor; imbalance power

0 引言

频率安全是电力系统安全稳定问题的重要部分之一, 对于发电设备、电网运行和用电设备都有重要影响, 因而倍受源-网-荷各方共同关注。面对当今电源结构和电网结构的变化态势, 频率安全问题

面临更为严峻的挑战, 新能源发电占比的增加使频率的灵活调控更加困难^[1-9], 特/超高压直流跨区域输电规模的扩大使频率安全问题的严重程度更加恶化^[10-11]。

通常对暂态安全性的要求可由基于给定频率偏移门槛值 f_{cr} 和偏出此给定值的频率异常持续时间构成的 t_{cr} 二元表来描述 (f_{cr}, t_{cr}) , 当且仅当频率偏出(低频安全评估时为低于, 高频安全评估时为高于) f_{cr} 的持续时间超过 t_{cr} 判为暂态频率不满足安全

基金项目: 国家电网公司科技项目资助“大型能源基地多直流、交直流送出系统网源协同频率稳定控制技术研究”

要求, 必要时可用多个二元表进行评估^[12]。系统受到大功率缺额或盈余的扰动后, 频率急剧变化, 仅靠发电和负荷的频率自动调节能力难以保证频率动态变化满足安全性要求, 需要依靠紧急控制措施才能避免频率安全事故的发生^[12]。频率安全紧急控制措施有: 送端电网的高频切机^[13-15], 以及受端电网直流紧急功率提升、抽蓄切泵、安控紧急切负荷和低频切负荷^[16-21]。驱动频率安全紧急控制装置动作有事件驱动和响应驱动两种机制^[22-23], 前者是在线监测到发生直流闭锁、大容量发电厂送出线路跳闸和电网解列等预想事件后, 搜索匹配离线策略表, 执行相应的控制策略; 后者是在线监测到频率偏移预设门槛值及其时间, 启动实施控制策略, 例如低频切负荷和高频切机。

基于上述频率安全要求, 进行紧急控制决策确定控制量、动作条件和时间的的方法有两类: (1) 基于单机带集中负荷模型, 用解析式描述不平衡功率扰动下的频率特性, 对给定功率不平衡量, 计算满足频率安全要求的控制策略^[13,24]; (2) 基于详细模型, 通过时域仿真得到不平衡功率扰动下的频率特性, 搜索计算在给定功率不平衡扰动场景下满足频率安全要求的控制策略, 在缺少频率安全量化指标时, 通常都基于二分法等试探性方法, 计算量大; 在定义了安全裕度指标时, 借助灵敏度分析以减小计算量^[25-26]。目前进行频率安全紧急控制决策的方法, 大多是基于不平衡功率对频率特性的影响, 确定发电或负荷的有功功率控制量。

在出现功率缺额时系统等值同步发电机转子(系统等值惯量转速)速度降低, 向电网注入动能, 在出现功率盈余时, 同步发电机转子速度增大, 从电网吸收动能, 减小不平衡功率引起的频率偏移程度。在研究系统整体频率变化情况时, 系统等值同步发电机转子动能变化真实反应了电网频率变化, 系统等值同步发电机转子动能变化源于不平衡功率累积的能量, 频率特性是不平衡功率时变特性与系统等值同步发电机转子动能动态变化交互影响的结果。

近来, 大规模储能装置和直流功率紧急调整成为频率安全紧急控制的新手段, 前者输出的能量受限, 后者达到输出功率控制目标需要经历一定时间, 都会对频率特性有一定程度的影响, 因而基于有功功率控制制定频率安全紧急控制策略存在一定的局限性。本文探讨从能量变化的视角, 研究频率安全紧急控制决策问题, 基于系统整体频率特性与系统等值同步发电机转子动能的关系, 将频率安全约束转化为对系统等值同步发电机转子动能的约束; 基于系统等值同步发电机转子动能变化与不平衡功率

累积能量的关联, 分析频率安全控制机理; 研究通过控制不平衡功率累积能量实现频率安全控制目标的控制决策方法。基于能量变化的频率安全控制决策理念与方法, 将控制发电或负荷的有功功率转变为控制其能量, 提高了控制决策的灵活性, 对于优化控制策略, 确保系统整体频率特性满足安全要求, 具有重要的指导意义。

1 基于能量变化的控制机理

1.1 频率安全约束转化为系统等值同步发电机转子动能的约束

基于给定频率偏移门槛值 f_{cr} 和偏出此给定值的频率异常持续时间构成的 t_{cr} 二元表 (f_{cr}, t_{cr}) 来描述频率安全性要求。不失一般性, 以发生功率缺额扰动下的频率安全约束为例, 对于给定的频率安全二元表 (f_{cr}, t_{cr}) , 如果频率偏移 f_{cr} 的时间不超过 t_{cr} , 则频率安全满足要求。研究系统整体频率特性, 系统中值发电机储存的动能 E_{kin} 与频率 f_s 的关系如式(1)所示。

$$E_{kin} = \frac{1}{2} J_s \cdot \omega_s^2 = \frac{1}{2} J_s (2\pi f_s)^2 \quad (1)$$

式中: J_s 是系统等值惯量; ω_s 是系统惯量中心角速度。

频率偏移门槛值 f_{cr} 对应的等值发电机储存的动能 $E_{kin_{cr}}$ 为

$$E_{kin_{cr}} = \frac{1}{2} J_s \cdot \omega_{scr}^2 = \frac{1}{2} J_s (2\pi f_{cr})^2 \quad (2)$$

式中, ω_{scr} 是频率偏移门槛值 f_{cr} 对应的系统惯量中心角速度。

由此, 在评估系统整体频率安全性时, 定义系统等值发电机储存的动能减小门槛值 $E_{kin_{cr}}$ 和持续时间 t_{cr} 二元表 $(E_{kin_{cr}}, t_{cr})$ 来等价描述频率安全性要求。基于系统等值发电机储存的动能评估系统频率安全性的方法是, 当且仅当系统等值发电机储存的动能超出(低频安全评估时为低于, 高频安全评估时为高于) $E_{kin_{cr}}$ 的持续时间超过 t_{cr} 时判为暂态频率偏移不满足安全要求。

1.2 系统等值同步发电机转子动能变化与不平衡功率累积能量的关联

研究分析系统机械功率和电气功率不平衡时的系统整体频率特性, 可用式(3)描述, 式(3)左边项是系统等值发电机储存动能的微分。

$$\frac{d\left(\frac{1}{2} J_s \cdot \omega_s^2\right)}{dt} = P_m - P_e \quad (3)$$

式中: P_m 是系统机械功率; P_e 是系统电气功率。

结合式(1)和式(3), 考虑时段(t_1, t_2)系统机械功率和电气功率不平衡功率的时变性, 以及系统等值惯量和频率的变化情况, 得到式(4)。

$$\int_{t_1}^{t_2} (P_m(t) - P_e(t)) dt = \frac{1}{2} J_s(t_2) \omega_s^2(t_2) - \frac{1}{2} J_s(t_1) \omega_s^2(t_1) = \frac{1}{2} J_s(t_2) (2\pi f_s(t_2))^2 - \frac{1}{2} J_s(t_1) (2\pi f_s(t_1))^2 \quad (4)$$

式(4)的物理意义是: 在时段(t_1, t_2), 系统不平衡功率累积的能量, 使系统等值发电机转子储存的动能由 t_1 时刻的 $\frac{1}{2} J_s(t_1) \omega_s^2(t_1)$ 变化为 t_2 时刻的 $\frac{1}{2} J_s(t_2) \omega_s^2(t_2)$, 相应的系统频率由 $f_s(t_1)$ 变化为 $f_s(t_2)$ 。式(4)符合能量守恒的基本原理, 从能量的视角, 揭示系统频率变化、系统等值发电机转子储存的动能变化和机械功率与电气功率的不平衡功率累积的能量三者之间的关系。

系统中发生大功率缺额/盈余事件, 受到大额不平衡功率的扰动, 在等值发电机惯量、负荷频率调节特性、发电机一次调频和安全稳定控制措施等综合作用下, 忽略调节引起的频率振荡过程, 系统整体频率动态过程大致经历两个阶段: (1) 首先快速下降/升高至最低/高值; (2) 然后缓慢恢复回升/落至稳态值。在第一阶段, 系统机械功率小于/大于电气功率, 不平衡功率为负/正, 累积负/正能量, 等值发电机转子释放/吸收相应的能量, 表现为等值发电机转子转速降低/升高, 系统频率降低/升高, 频率变化率为负/正。在两个阶段的转折点, 系统频率为最低/高值, 等值发电机转子储存的动能达到最小/最大值, 不平衡功率暂时为零, 频率变化率暂时为零。在第二阶段, 不平衡功率为正/负, 累积正/负能量, 等值发电机转子吸收/释放相应的能量, 表现为等值发电机转子转速升高/降低, 系统频率升高/降低, 频率变化率为负/正。系统频率恢复至稳态后, 频率变化率为零, 表现为等值发电机转子转速保持基本不变, 其储存的动能也不变, 根源是系统中机械功率与电气功率相等, 不平衡功率为零, 不累积新的不平衡能量。

综上所述, 在不平衡功率的扰动冲击下, 在本质上是平衡功率累积能量使系统等值发电机转子储存的动能发生变化, 并且不平衡功率累积能量与系统等值发电机转子储存动能的变化量相同。

1.3 基于能量变化的控制机理

系统中发生功率缺额/盈余事件, 受到不平衡功

率的扰动冲击, 如果在负荷频率调节特性和发电机一次调频等综合作用下, 频率动态变化不能满足上述频率安全二元表要求, 则需要采取紧急控制措施, 紧急控制的安全目标是满足频率安全二元(f_{cr}, t_{cr})要求。

鉴于上述频率安全二元表(f_{cr}, t_{cr})与系统等值发电机转子存储的动能二元表(E_{kincr}, t_{cr})之间的关系, 基于能量变化的视角, 研究系统整体频率特性的紧急控制决策问题, 控制的安全目标可等价地转换为系统等值发电机转子存储的动能满足二元表(E_{kincr}, t_{cr})要求。显然, 以扰动发生时刻前系统等值发电机转子存储的动能 E_{kin0} 为初始条件, 可以等价地通过控制系统等值发电机转子存储动能的变化量, 实现系统等值发电机转子存储动能的控制目标。进一步考虑, 在不平衡功率的扰动冲击下, 不平衡功率累积能量与系统等值发电机转子存储动能的变化量相同。因而可见, 通过控制不平衡功率累积能量, 能够实现控制系统频率安全的目标。

针对频率不安全的情况, 不失一般性, 频率偏移逾越二元表(f_{cr}, t_{cr}), 基于能量变化进行频率安全紧急控制决策。在动态过程中, 频率偏移至临界值 f_{cr} 的时刻为 t_0 , 对应的系统等值发电机转子存储动能为 E_{kincr} , 在($t_0, t_0 + t_{cr}$)内, 频率有两种变化趋势。一种是频率偏移逾越 f_{cr} 的幅度呈现增大趋势, 系统等值发电机转子存储的动能逾越 E_{kincr} 的幅度呈现增大趋势, 至时刻 $t_0 + t_{cr}$ 系统等值发电机转子存储动能 E_{kinend} , 逾越 E_{kincr} 的程度为 $E_{kinend} - E_{kincr}$; 另一种是频率越过最低点后开始逐渐回升趋势, 系统等值动能在达到最大值后逐渐减小, 若至时刻 $t_0 + t_{cr}$ 系统等值发电机转子存储动能 E_{kinend} , 逾越 E_{kincr} 的程度仍然为 $E_{kinend} - E_{kincr}$ 。为满足频率安全要求, 通过控制($t_0, t_0 + t_{cr}$)时段内的不平衡功率累积能量, 满足式(5)。

$$\int_{t_0}^{t_0+t_{cr}} (\Delta P_m(t) - \Delta P_e(t)) dt \geq E_{kincr} - E_{kinend} \quad (5)$$

式中: $\Delta P_m(t)$ 和 $\Delta P_e(t)$ 分别是机械功率控制量和电气功率控制量。

考虑到不平衡功率累积能量的可加性, 系统等值发电机转子存储动能与不平衡功率累积能量之间的正向单调关系, 在扰动发生后的起始时刻 0^+ 至时刻 $t_0 + t_{cr}$, 通过控制不平衡功率累积能量满足式(6), 与式(5)对频率安全影响的控制效果相同。

$$\int_{0^+}^{t_0+t_{cr}} (\Delta P_m(t) - \Delta P_e(t)) dt \geq E_{kincr} - E_{kinend} \quad (6)$$

2 控制决策方法

基于能量变化进行频率安全紧急控制决策的流程如图 1 所示, 根据时域仿真结果进行暂态频率安全评估, 针对暂态频率不满足安全二元表的情况, 确定不平衡功率累积能量的控制总量, 再将其分解到各类控制措施与控制对象, 通过迭代计算, 得到满足暂态频率安全的控制策略, 控制总量计算和控制量分配是控制决策过程的关键环节。

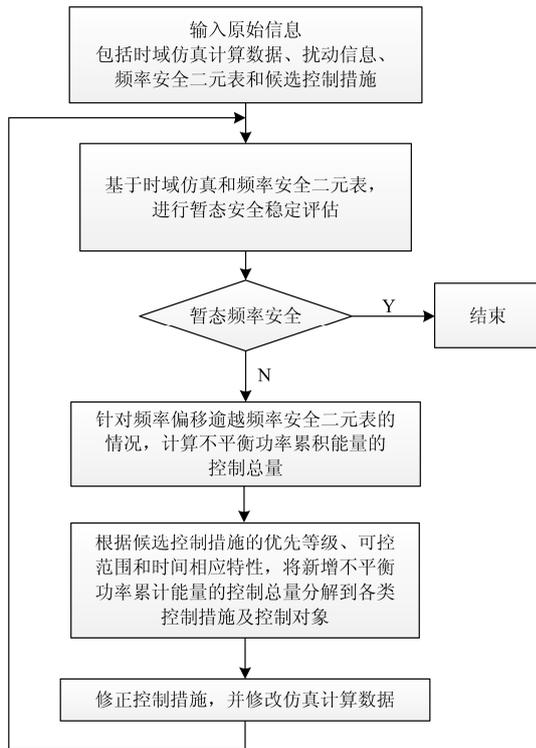


图 1 基于能量变化进行频率安全紧急控制决策的流程

Fig. 1 Flow chart of frequency security emergency control decision based on energy change

2.2 改变不平衡功率累积能量的控制总量计算

下面介绍迭代过程中不平衡功率累积能量的控制总量的计算步骤。

实际运行要求中, 频率偏移可能逾越 1 个或多个二元表, 针对合计有 N 个二元表的情况, 首先按照频率偏移阈值由大到小的顺序排序, 得到 N 个二元表 (f_{cri}, t_{cri}) , 然后进行迭代计算。

(1) 基于详细模型, 计及前几轮计算得到的紧急控制措施(第一轮仿真计算时不计及紧急控制措施), 进行扰动下的时域仿真, 分析系统等值惯量的频率特性曲线, 若频率偏移超过 f_{cri} 的持续时间未超过 t_{cri} , 则频率满足该二元表 (f_{cri}, t_{cri}) , 校核下一个二元表。

(2) 若频率偏移逾越未满足二元表 (f_{cri}, t_{cri}) , 则遴选出频率偏移至 f_{cri} 且持续逾越 f_{cri} 的时间超过 t_{cri} 的时间窗口 $(t_{0i}, t_{0i} + t_{cri})$; 计算 $t_{0i} + t_{cri}$ 时刻系统等值发电机存储的动能 $E_{kinendi}$, 与 f_{cri} 对应的系统等值发电机存储的动能 $E_{kinetri}$ 比较, 得到在 $t_{0i} + t_{cri}$ 时刻前要完成不平衡功率累积能量改变的控制总量 $E_{kinetri} - E_{kinendi}$; 形成满足频率安全二元表 (f_{cri}, t_{cri}) 要求的不平衡功率累积能量改变的控制总量及其时间要求的二元表 $(t_{0i} + t_{cri}, E_{kinetri} - E_{kinendi})$ 。采取相应容量的控制措施后, 返回步骤(1)进行迭代校核。

2.2 控制总量分解

在明确 $t_{0i} + t_{cri}$ 前要完成的不平衡功率累积能量的控制总量 $E_{kinetri}$ 要求后, 综合分析每类控制措施的优先级、候选控制对象的控制响应时间特性和控制能力, 将每个时段的控制总量要求分解到具体的候选控制对象, 从而形成控制策略。

频率安全紧急控制措施有多种类型, 减少功率缺额的紧急控制措施有直流紧急提升受电功率、抽蓄切泵和紧急切/降负荷, 减少功率盈余的紧急控制措施有直流紧急提升外送功率、切机或快速降发电出力。综合统筹工程应用条件和控制代价, 确定各类控制措施的控制优先级。在控制响应时间特性满足要求的前提下, 优先级高的控制能力用完后, 再选用优先级低的控制措施。例如, 在所有直流紧急提升受电功率和抽蓄切泵措施实施后还不能恢复频率安全性时, 才考虑紧急切/降负荷的措施。

从监测到电网故障、感受到大额不平衡功率扰动, 至控制对象接受到控制命令开始执行控制措施需要一定的时间, 控制对象接受到控制目标要求至控制目标实现也可能存在一定的延时, 特别是对于直流紧急功率提升、紧急降负荷和紧急降发电出力等连续型控制更为明显。基于能量变化的紧急控制决策, 不仅关注接收到控制指令后至达到功率控制目标值的时间, 而且更为看重功率控制累积的能量, 因而对控制的时间响应特性尤为关切。某个候选控制对象的控制响应时间特性是, 基于控制功率随时间变化的函数, 得到控制功率累积的能量随时间变化的情况。

某个候选控制对象的控制能力是根据控制对象的最大调控范围, 例如, 对于直流紧急功率提升上限是其过载能力, 结合控制响应时间特性, 得到至特定时刻 $t_{0i} + t_{cri}$ 时功率控制累积的能量最大值。

将 $t_{0i} + t_{cri}$ 前要完成的控制总量 $E_{kinetri}$ 分解落实到具体候选控制对象的流程如图 2 所示。以充分利用高优先级的控制功率累积能量为原则, 计及候选

控制对象在指定时刻前具备的控制功率累积能量的最大能力,选择候选控制对象,统计控制总量,与控制总量目标值进行匹配,从而将控制功率累积能量总量目标值分解落实到候选控制对象,形成控制策略。

需要说明的是,在通过图 2 流程得到各个控制对象的功率控制累积能量要求后,要进一步通过功率响应时间特性,将功率控制累积能量目标值转换为功率控制目标值,才能成为可实施操作的控制策略。

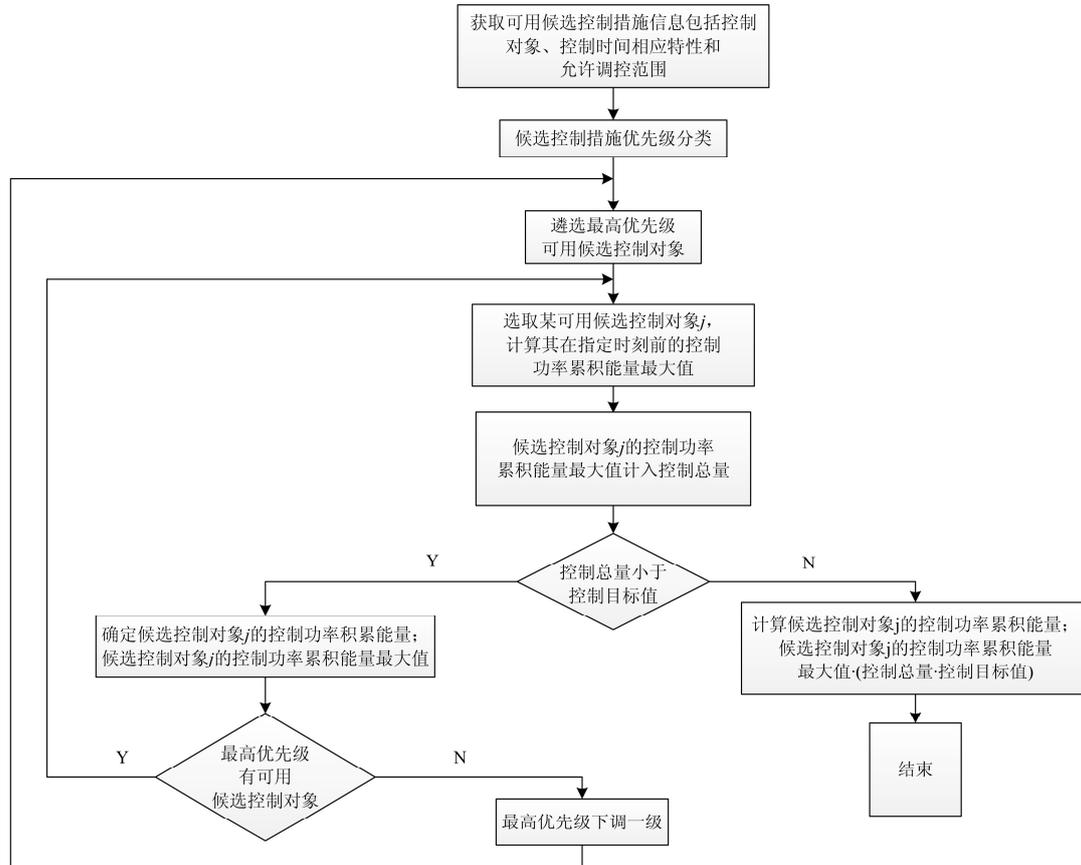


图 2 控制功率累积能量总量分解到控制对象的流程

Fig. 2 Flow chart of the total energy assigned to control objects

3 仿真算例分析

3.1 算例一

基于 2017 年华东电网汛期低谷典型方式,其中负荷 1.30 亿 kW, 开机 1.10 亿 kW, 接受外来直流落地总功率 4 500 万 kW, 锦苏直流双极落地功率 675 万 kW。发生锦苏直流双极闭锁故障,不采取任何控制措施,系统频率最低跌落至 48.94 Hz,若系统需要满足的频率安全二元表为(49.5 Hz, 3 s),根据系统频率响应曲线,在 3.11 s 系统频率达到 49.5 Hz, 6.11 s 系统频率达到 49.30 Hz。在当前运行方式下,电网可以采取的紧急控制措施按照控制代价优先级排序依次为直流功率紧急支援、抽蓄切泵和切负荷,考虑直流过负荷能力、抽水蓄能电站及切负荷站点的运行状态,各控制措施最大控制量依次为 1 200 MW, 6 700 MW 和 1 000 MW。这三种措施从

故障发生到安控动作均能确保在 0.3 s 以内完成响应。按照本文所提方法迭代给出控制措施,迭代过程中的关键信息量如表 1 所示。

表 1 锦苏直流双极闭锁后的迭代信息

Table 1 Iterative computation information of Jinping-Sunan

DC bipolar blocked			
迭代次数	偏移 49.5 Hz 后 3 s 频率/Hz	累积能量/MW·s	故障后 0.3 s 能够一次性采取措施情况下,需要的措施量/MW
0	49.30	8 880	1 461
1	49.39	4 889	637
2	49.44	2 668	278
3	49.46	1 779	155
4	49.48	890	65
5	49.49	445	30
6	49.49	445	29
7	49.50	0	0

可以看出, 迭代 7 次后, 频率能够恰好满足二元表, 即为保证该方式下锦苏直流双极闭锁后系统频率满足频率安全二元表为(49.5 Hz, 3 s), 需要在故障后一次性采取 2 655 MW 的措施。按照控制的优先级, 直流功率紧急提升 1 200 MW, 切除抽蓄机组 1 455 MW, 控制措施施加前后系统频率响应曲线如图 3 所示。

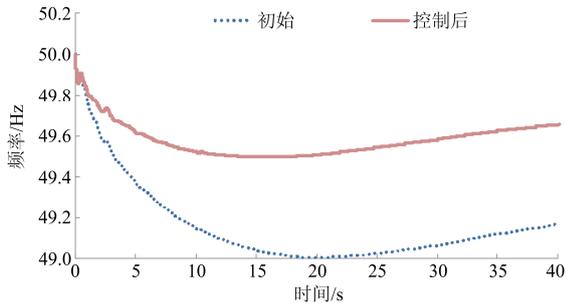


图 3 锦苏直流双极闭锁, 控制措施实施前后的频率响应曲线

Fig. 3 Frequency curve after Jinping-Sunan DC bipolar block under different control measurements

3.2 算例二

基于算例一同样的边界条件下, 若发生的故障为锦苏直流单极闭锁, 频率最低跌落至 49.68 Hz, 若频率安全二元表为(49.75 Hz, 15 s), 根据系统频率响应曲线, 在 4.52 s 系统频率达到 49.75 Hz, 11.88 s 系统频率达到最小值 49.68 Hz, 19.52 s 系统频率达到 49.71 Hz, 按照本文所提方法迭代给出控制措施, 3 次迭代后系统频率可以满足二元表要求。其中, 迭代过程中的关键信息量如表 2 所示。

表 2 锦苏直流单极闭锁后的迭代信息

Table 2 Iterative computation information of Jinping-Sunan DC unipolar blocked

迭代次数	偏移 49.75Hz 后 15 s 频率/Hz	累积能量/ MW · s	故障后 0.3 s 能够一次性 采取措施情况下, 需要的 措施量/MW
0	49.71	1788	92
1	49.73	894	45
2	49.74	447	25
3	49.75	0	0

可以看出, 在这种情况下, 迭代 3 次后, 频率也能够恰好满足二元表, 即为保证该方式下锦苏直流单极闭锁后系统频率满足频率安全二元表为(49.75 Hz, 15 s), 需要在故障后一次性采取 162 MW 的措施。按照控制的优先级, 直流功率紧急提升 162 MW, 控制措施施加前后系统频率响应曲线如图 4 所示。

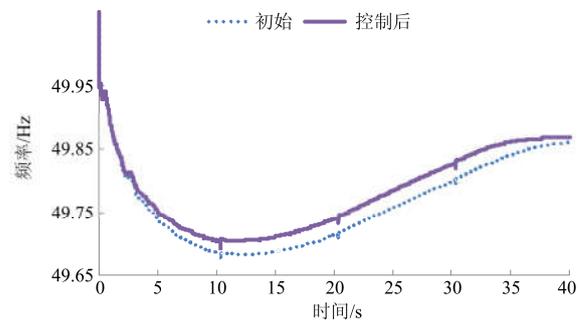


图 4 锦苏直流单极闭锁, 控制措施实施前后频率响应曲线

Fig. 4 Frequency curve after Jinping-Sunan DC unipolar block under different control measurements

4 结语

随着新能源并网规模增长和大范围交换输电容量的提升, 频率安全问题应受到更多关注。紧急控制是提高不平衡功率大扰动下频率安全水平的重要技术措施。

本文从能量变化的角度, 分析研究频率安全紧急控制决策问题。研究表明, 基于系统整体频率特性与系统等值同步发电机转子动能的关系, 可将频率安全约束转化为对系统等值同步发电机转子动能的约束; 利用系统等值同步发电机转子动能变化与不平衡功率累积能量之间存在的关联, 可通过控制不平衡功率累积能量实现频率安全控制目标。

基于本文提出的控制决策方法, 将以往控制有功功率转化为控制一定时间内的能量, 可以体现功率控制的时间响应特性的影响, 也增加了控制决策的灵活性。

参考文献

- [1] ULBIG A, BORSCHKE T S, ANDERSSON G. Impact of low rotational inertia on power system stability and operation[C] // The 19th World Congress, The International Federation of Automatic Control, August 24-29, 2014, Cape Town, South Africa: 7290-7297.
- [2] 程含渺, 李红斌, 邵周策, 等. 考虑多种影响因素的电网频率概率分布研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 9-15.
CHENG Hanmiao, LI Hongbin, SHAO Zhouce, et al. Research on distribution of power frequency considering on multiple influence factors[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 9-15.
- [3] TIELENS P, HERTEM D V. Grid inertia and frequency control in power systems with high penetration of renewables[C] // Young Researchers Symposium in

- Electrical Power Engineering, April 2012, Netherlands: 1-6.
- [4] 赵冬梅, 许瑞庆, 郑立鑫. 全风况下双馈风机参与调频的协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 53-59.
ZHAO Dongmei, XU Ruiqing, ZHENG Lixin. Research on coordinated control strategy for DFIGs participating in system frequency regulation with different wind[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 53-59.
- [5] 李生虎, 王鹏飞, 朱国伟. 考虑双馈异步发电机转速限制的电网频率协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 82-87.
LI Shenghu, WANG Pengfei, ZHU Guowei. Coordinated grid frequency control strategy of doubly-fed induction generator considering its rotor speed constraints[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 82-87.
- [6] 张海丽, 胡亚喆, 徐广文. 增强型人工频率死区对一次调频响应的影响分析[J]. 广东电力, 2016, 29(8): 56-59, 128.
ZHANG Haili, HU Yazhe, XU Guangwen. Analysis on influence of enhanced artificial frequency dead zone on primary frequency modulation response[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(8): 56-59, 128.
- [7] 田新首, 迟永宁, 汤海雁, 等. 一种双馈风电机组频率控制器[J]. 广东电力, 2016, 29(6): 43-49.
TIAN Xinshou, CHI Yongning, TANG Haiyan, et al. A kind of frequency controller for doubly-fed induction generators[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(6): 43-49.
- [8] 丁宁, 廖金龙, 陈波, 等. 大功率火电机组一次调频能力仿真与试验[J]. 热力发电, 2018, 47(6): 85-90.
DING Ning, LIAO Jinlong, CHEN Bo, et al. Primary frequency control ability of thermal power units with large capacity: simulation and experiment[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(6): 85-90.
- [9] 牟春华, 兀鹏越, 孙钢虎, 等. 火电机组与储能系统联合自动发电控制调频技术及应用[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 29-34.
MU Chunhua, WU Pengyue, SUN Ganghu, et al. AGC frequency modulation technology and application for combination of thermal power unit and energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 29-34.
- [10] 高翔, 高伏英, 杨增辉. 华东电网因直流故障的频率事故分析[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 102-107.
GAO Xiang, GAO Fuying, YANG Zenghui. Frequency accident analysis in East China Grid due to DC line fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(12): 102-107.
- [11] 李兆伟, 吴雪莲. “9·19”锦苏直流双极闭锁事故华东电网频率特性仿真分析及思考[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 149-155.
LI Zhaowei, WU Xuelian. Analysis and reflection on frequency characteristic of East China Grid after bipolar locking of “9·19”Jinping-Sunan DC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 149-155.
- [12] 徐泰山, 薛禹胜. 暂态频率偏移可接受性的定量分析[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(19): 7-10.
XU Taishan, XUE Yusheng. Quantitative assessments of transient frequency deviation acceptability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(19): 7-10.
- [13] 张志强, 徐友平, 袁荣湘, 等. 大型互联区域电网解列后送端电网频率特性及高频切机方案[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 288-293.
ZHANG Zhiqiang, XU Youping, YUAN Rongxiang, et al. Frequency characteristics of power grid at sending end of split large-scale interconnected regional power grid and corresponding over-frequency generator-tripping scheme[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 288-293.
- [14] 张志强, 袁荣湘, 徐友平, 等. 适应多回特高压直流的四川电网高频切机优化[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2): 141-146.
ZHANG Zhiqiang, YUAN Rongxiang, XU Youping, et al. Optimization of over-frequency generator-tripping scheme in Sichuan power grid adaptable to multi-UHVDC transmission project[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 141-146.
- [15] 陈赞, 陈得治, 马世英, 等. 风光火打捆交直流外送系统的高频切机方案研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 186-192.
CHEN Yun, CHEN Dezhi, MA Shiying, et al. Studies on high-frequency generator tripping strategy for wind-photovoltaic-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 186-192.
- [16] BEVRANI H, LEDWICH G, FORD J J, et al. On power system frequency control in emergency conditions[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2008, 4(3): 499-508.
- [17] SAINI S, SAINI S. Underfrequency load shedding approach: a review paper[C] // Proceedings of 7th IRF International Conference, April 27, 2014, Pune, India: 61-64.

- [18] ABEDINI M, SANAYE-PASAND M, AZIZI S. Adaptive load shedding scheme to preserve the power system stability following large disturbances[J]. IET Generation, Transmission, and Distribution, 2014, 8(12): 2124-2133.
- [19] 李碧君, 黄志龙, 刘福锁, 等. 直流紧急功率支援用于第三道防线的研究[J]. 中国电力, 2016, 49(6): 72-77.
LI Bijun, HUANG Zhilong, LIU Fusuo, et al. A study on the emergency DC power support as the third defense of the power system[J]. Electric Power, 2016, 49(6): 72-77.
- [20] 李碧君, 李兆伟, 吴雪莲, 等. 多直流馈入受端电网两段式频率安全紧急控制策略研究[J]. 中国电力, 2017, 50(2): 169-174.
LI Bijun, LI Zhaowei, WU Xuelian, et al. Study on the two-stage frequency security emergency control strategy for multi-infeed HVDC receiving systems[J]. Electric Power, 2017, 50(2): 169-174.
- [21] 罗建裕, 李海峰, 江叶峰, 等. 基于稳控技术的源网荷友好互动精准负荷控制系统[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 25-29.
LUO Jianyu, LI Haifeng, JIANG Yefeng, et al. Source network load friendly interactive and precise load control system based on stability control technology[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 25-29.
- [22] TANG Lei, MCCALLEY J. Two-stage load control for severe under-frequency conditions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 1943-1953.
- [23] 王达, 薛禹胜, WU Q H, 等. 故障驱动切负荷和轨迹驱动切负荷的协调优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 1-6.
WANG Da, XUE Yusheng, WU Q H, et al. Optimization and coordination of fault-driven load shedding and trajectory-driven load shedding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 1-6.
- [24] 电力系统自动低频减负荷技术规定: DL/T 428—2010[S]. 北京: 国家能源局, 2011.
- [25] 徐泰山, 李碧君, 鲍颜红, 等. 考虑暂态安全性的低频低压减载量的全局优化[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 12-15.
XU Taishan, LI Bijun, BAO Yanhong, et al. Optimal parameter-setting of under-frequency and under-voltage load shedding for transient security[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 12-15.
- [26] 张恒旭, 刘玉田, 薛禹胜. 考虑累积效应的频率偏移安全性量化评估[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(24): 5-10.
ZHANG Hengxu, LIU Yutian, XUE Yusheng. Quantitative assessment of transient frequency deviation security considering cumulative effect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(24): 5-10.

收稿日期: 2017-09-22; 修回日期: 2018-06-27

作者简介:

李碧君(1966—), 男, 通信作者, 博士, 研究员级高工, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制; E-mail: libijun@sgepri.sgcc.com.cn

李兆伟(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制; E-mail: lizhaowei@sgepri.sgcc.com.cn

吴雪莲(1989—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制; E-mail: wuxuelian@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 姜新丽)