

DOI: 10.7667/PSPC151194

紧急负荷调节用于安全稳定紧急控制的研究

李碧君, 侯玉强

(南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106)

摘要: 为了应对某些场景下紧急控制措施难以实施的问题, 并尽可能提高对用户供电的友好性和安全稳定紧急控制的精准度, 提出将紧急负荷调节作为安全稳定紧急控制手段。从安全稳定紧急控制的角度分析紧急负荷调节的典型特征; 基于扩展等面积准则(EEAC)剖析紧急负荷调节特性影响暂态稳定控制效果的机理, 并与常规紧急切负荷控制进行对比, 研究紧急负荷调节特性变化对暂态稳定紧急控制效果的影响。基于实际电网, 仿真分析紧急调节电解铝负荷用于安全稳定紧急控制, 验证了分析结论。

关键词: 紧急负荷调节; 暂态稳定; 安全稳定紧急控制; EEAC

Research of emergency load regulation for security and stability control

LI Bijun, HOU Yuqiang

(NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China)

Abstract: To cope with the problem that emergency control measure is difficult to implement under some scenes and improve the friendliness of user power supply and accuracy of security and stability control, emergency load regulation for security and stability control is studied. In the view of stability emergency control, the characteristic of emergency load regulation is analyzed. Compared to emergency load shedding, the mechanism of the effects of emergency load regulation for stability control is studied based on EEAC (Extended Equal Area Criterion), of which the control result is influenced by emergency load regulation performance. The conclusion is verified by simulating and analyzing emergency regulation electrolytic aluminum load for stability control in real power grid.

Key words: emergency load regulation; transient stability; emergency control of stability and security; EEAC (Extended Equal Area Criterion)

0 引言

负荷作为电力系统的重要组成部分, 其特性和调控能力很大程度上影响电网运行的安全性、经济性和优质性水平^[1-3]。负荷模型表征负荷受电网动态过程中母线电压和频率等物理量变化影响的特性, 文献[4]研究了负荷建模问题, 文献[5]研究了负荷模型对多回直流系统同时换相失败的影响, 文献[6]研究了负荷模型影响联网系统功角稳定性的机理, 文献[7]研究了负荷模型对安全稳定紧急控制效果的影响, 这些研究成果对于把握负荷特性对安全稳定水平的影响机理和控制效果的影响程度具有重要参考价值。负荷的可调控能力是负荷特性的另一重要方面, 体现在可根据需要进行控制, 包括可中断负荷和可调节负荷两种形式。负荷控制作为提高电网紧急状态下安全稳定性的控制措施, 是体现负荷侧

对电网运行有益贡献的主要方面之一。

按控制时机, 暂态稳定控制分为预防控制^[8]和紧急控制^[9]。目前, 工业界通常通过跳开负荷馈线断路器来实施紧急切负荷控制^[10], 有关负荷侧参与安全稳定紧急控制的理论研究也大多是基于紧急切负荷^[11-12]。切负荷控制的显著优点是执行简单与响应快捷, 但其属于离散控制, 即使分轮次执行, 控制的颗粒度也比较大, 由此可能带来一系列问题: (1)控制精度差, 容易造成欠切或过切, 控制策略优化难度大; (2)用户用电中断, 不仅导致对用户供电的友好性下降, 影响电网企业形象, 还可能造成较大经济损失或社会影响; 国务院 599 号令^[13]颁布更进一步加大了切负荷控制的实施难度; (3)特别的, 对于一些独立电网^[14]或微网^[15], 例如海岛电网^[16], 紧急切负荷控制因可能造成重大经济损失而难以有效实施。如何应对切负荷控制的这些不足, 目前还

鲜见报道。

电网中有些类型的负荷,尤其是部分工业负荷,具有大比例、快速连续调节能力,允许在短时间内大幅度降低负荷功率。通过对这类负荷进行紧急调节,而不是简单地中断负荷供电可有望在保证电网安全稳定的前提下,提高紧急控制的精细化水平,改善安全稳定控制效果,最大限度地减少对用户用电体验的干扰,提升网-荷友好性;同时,也有望解决某些场景下紧急切负荷控制措施难以实施的问题。因此,深入研究紧急负荷调节用于安全稳定紧急控制的相关问题具有重要意义。

与紧急切负荷相比,紧急负荷调节的特点是从执行控制命令到完成控制目标往往存在时滞和超调,并伴随着相对较长时间的动态调节过程,对控制效果产生一定影响。EEAC 是电力系统安全稳定量化分析理论的核心之一^[17],能够为研究控制措施影响安全稳定特性机理与分析评估控制效果提供理论依据和方法论^[18-20]。本文从安全稳定紧急控制的角度分析紧急负荷调节的典型特征,基于 EEAC 剖析紧急负荷调节特性影响安全稳定控制效果的机理,并与常规切负荷控制进行对比分析;继而研究紧急负荷调节特性变化对暂态稳定紧急控制效果的影响,阐述紧急负荷调节用于安全稳定紧急控制工程实施中要注意的一些问题,为在安全稳定紧急控制中更好地应用紧急负荷调节提供有益参考。

1 紧急负荷调节用于安全稳定紧急控制

1.1 紧急负荷调节参与安全稳定紧急控制

紧急负荷调节用于安全稳定紧急控制如图 1 所示,安控执行站收到切负荷控制策略后,向负荷调节系统下达减负荷命令和减负荷量,由负荷调节系统实现负荷调节控制目标,负荷与电网侧系统依然保持联通状态。可见,实施紧急负荷调节的基本前提是,负荷具有一定变化幅度和快速响应的调节能力;而且负荷侧通常需配置相应的自动调节系统,该系统能够接受安控执行站的减负荷命令,并根据减负荷控制目标要求快速、稳定地调节负荷。

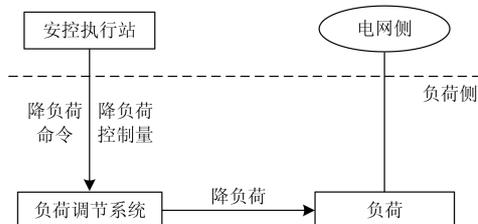


图 1 紧急负荷调节参与安全稳定紧急控制示意图

Fig. 1 Emergency load regulation participating in security and stability control

安全稳定紧急控制需要采用紧急负荷调节的典型场景是:(1)通过对可中断负荷进行切负荷控制不能匹配到合适的控制策略,出现过切或欠切;(2)通过对可中断负荷进行切负荷控制,虽然能够满足安全稳定的要求,但由于切负荷量偏大,可能造成负荷损失达到较高的事故等级^[13],通过紧急负荷调节可以在满足安全稳定水平要求的前提下减少负荷控制量。

1.2 紧急负荷调节控制过程中负荷变化特点

假定 T_0 时刻安全稳定控制系统执行同等的减负荷控制量 ΔP_L ,紧急切负荷控制是令负荷有功功率瞬时减少 ΔP_L ,而紧急负荷调节则存在动态过程。两种情况下安控命令执行后的负荷 $P(t)$ 在 T_0 时刻之后的变化情况可分别用式(1)和式(2)表示。

$$P(t) = P_{T_0} - \Delta P_L \quad (1)$$

$$P(t) = P_{T_0} - \Delta P(t) \quad (2)$$

式中: P_{T_0} 是安控命令执行前 T_0 时刻的负荷; $\Delta P(t)$ 表示紧急负荷调节的功率变化随时间变化。

不失一般性,紧急负荷调节的时间响应特性可用图 2 表示,其中 T_1 表示负荷调节首次达到目标值的时刻, T_2 表示负荷调节达到峰值的时刻, T_3 表示负荷调节再次达到目标值的时刻, T_4 表示调节结束时刻(负荷调节包络线进入 5% 误差带)。对于解决暂态稳定问题的安全稳定紧急控制, $T_0 \sim T_3$ 阶段的负荷变化特性是研究重点。从图 2 可见, $T_0 \sim T_1$ 阶段,控制量 $\Delta P(t)$ 小于安控要求的减负荷量 ΔP_L ,处于控制时滞阶段; $T_1 \sim T_3$ 阶段,控制量 $\Delta P(t)$ 大于安控要求的减负荷量 ΔP_L ,处于超调阶段。紧急负荷调节存在的时滞和超调,必然对安全稳定紧急控制效果产生一定影响,在制订安全稳定控制策略时,需根据负荷调节系统的实际控制特性来确定紧急负荷调节的控制目标量,而不能简单地套用切负荷控制措施量。

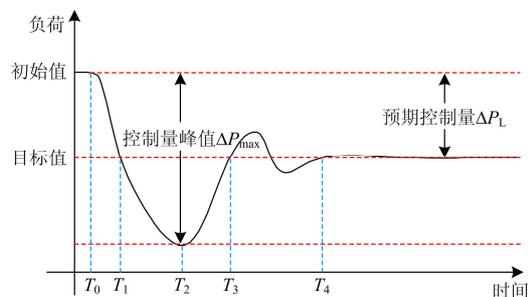


图 2 紧急负荷调节控制的时间响应特性

Fig. 2 Time response characteristics of emergency load regulation control

2 紧急负荷调节特性对暂态稳定性的影响

2.1 降负荷控制提高暂态稳定性的机理

分析降负荷提高电网暂态稳定性的机理, 可以基于 EEAC 简单模型, 着重研究电磁功率变化。该模型忽略群内各机组非同调性, 认为群内发电机功角轨迹与群内惯量中心轨迹一致。基于该模型, 主导映象系统退化为经典的 OMIB, 其电磁功率 P_e 如式(3)所示^[17]。

$$P_e = P_c + P_{\max} \sin(\delta - \gamma) \quad (3)$$

其中, δ 是主导映象系统的功角, 其他各项表述如式(4)~式(8)所示。

$$P_c = (M_a \sum_{i,k \in S} g_{ik} - M_s \sum_{j,l \in A} g_{jl}) M_T^{-1} \quad (4)$$

$$\gamma = -\arctan \frac{C}{D} \quad (5)$$

$$P_{\max} = \sqrt{(C^2 + D^2)} \quad (6)$$

$$C = (M_a - M_s) M_T^{-1} \sum_{i \in S} \sum_{j \in A} g_{ij} \quad (7)$$

$$D = \sum_{i \in S} \sum_{j \in A} b_{ij} \quad (8)$$

在以上各式中, M_s (或 M_a) 为临界群 S (或余下群 A) 的等值惯量, M_T 为系统的等值惯量; g_{ij} 和 b_{ij} 是降阶导纳阵元素。

根据电网络分析理论, 进行保留发电机节点导纳降阶处理时, 负荷节点可按负荷移置系数移置到发电机节点^[21]。因而, 在降阶导纳阵元素中, 有部分自导纳是负荷移置产生的。电网受到大扰动后, 紧急降负荷控制将使自导纳元素 g_{ij} 变小。对于暂态稳定而言, 由于临界群发电机节点与余下群负荷节点的联系比较薄弱, 降负荷控制主要是减少余下群的负荷需求, 对临界群发电机节点自导纳的影响可以忽略。因此, 暂态稳定紧急降负荷措施, 将使余下群发电机节点的自导纳元素 $g_{ij} (i \in A)$ 变小, 即式(4)中第二项变小, 由此引起 P_c 增大, 继而导致主导映象系统的电磁功率 P_e 增加。在正摆阶段, 电磁功率 P_e 增加相当于增大减速面积, 如图 3 所示的 P_e 大于 P_m 阴影部分, 因而有利于提高暂态稳定性。

2.2 紧急负荷调节与切负荷控制效果的差异

对切负荷控制和紧急负荷调节下达控制目标相同的控制指令, 下面分析两者控制效果的差异。

在均一网络中, 节点 j 负荷减少 ΔP_j , 余下群发电机节点 i 的自导纳元素减小 $\alpha_{ij} \Delta P_j$, α_{ij} 是节点 j 负荷移置到发电机节点 i 的自导纳变化系数, 为实数。

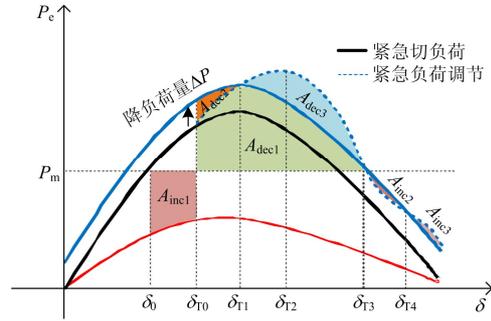


图3 降负荷提高正摆暂态稳定性示意图

Fig. 3 Improving transient stability by reducing load

在 T_0 时刻, 对节点 j 执行切负荷 ΔP_j 的控制, 发电机节点 i 的自导纳变化量为 Δg_{ij} , 如式(9)所示; 对节点 j 执行紧急负荷调节 ΔP_j 的控制, 经历时滞和超调动态过程, 在 T_4 时刻基本实现减负荷 ΔP_j 的控制目标, 在 T_0 至 T_4 阶段发电机节点 i 的自导纳变化量 $\Delta g_{ij}(t)$ 为式(10)所示, T_4 时刻以后发电机节点 i 的自导纳变化量 $\Delta g_{ij}(t)$ 与切负荷 ΔP_j 的控制效果基本相同。

$$\Delta g_{ij}(t) = -\alpha_{ij} \Delta P_j \quad (9)$$

$$\Delta g_{ij}(t) = -\alpha_{ij} \Delta P_j(t), T_0 \leq t \leq T_4 \quad (10)$$

基于图2所示紧急负荷调节特性曲线和图3所示的降负荷控制示意图, 结合式(3)、式(4)、式(9)与式(10), 对比分析紧急负荷调节与切负荷控制效果的差异, 着重分析 T_0 至 T_1 和 T_1 至 T_3 两个时段。

① 在 T_0 至 T_1 时段, 紧急负荷调节的实际控制量小于预期目标, 相应的余下群发电机节点自导纳减少量小于切负荷控制时的余下群发电机节点自导纳减少量。由图3可知, 紧急负荷调节使得减速面积增加的幅度比切负荷控制时小 A_{dec2} , 该阶段紧急负荷调节的控制效果不如切负荷控制。

② 在 T_1 至 T_3 时段, 紧急负荷调节控制出现超调, 实际控制量超过预期目标, 相应的余下群发电机节点自导纳减少量大于切负荷控制时余下群发电机节点自导纳减少量。两者对暂态稳定控制效果的影响差异与这个时段内主导映象对应功角轨迹的特性有关: 如果主导映象的功角一直处于正向摆次, 则紧急负荷调节使得减速面积增加的幅度比切负荷控制时大 A_{dec3} , 紧急负荷调节控制效果优于切负荷控制; 如果主导映象的功角开始处于正向摆次, 在经历一段时间 T_1 至 T_3' 后开始回摆, 则在 T_1 至 T_3' 阶段紧急负荷调节的控制效果优于切负荷控制; 而在 T_3' 至 T_3 , 余下群发电机节点自导纳减少量的继续增大, 对反向摆次的稳定性不利, 紧急负荷调节的超调控

制反而削弱控制效果, 甚至出现控制负效应^[17,22]; 在 T_1 至 T_3 这段时段内, 紧急负荷调节与切负荷两类控制整体效果的优劣, 取决于紧急负荷调节在正向摆次控制效果改善程度与在反向摆次控制效果削弱程度的比较。

综上所述, 与切负荷控制比较, 在紧急负荷调节控制实施过程中, 在有些时段紧急减负荷调节会削弱控制效果, 在有些时段则会增强控制效果。由图3可知, 当减速面积 $A_{dec3} > A_{dec2}$ 时, 紧急负荷调节的整体控制效果优于紧急切负荷控制。

2.3 紧急负荷调节特性变化对暂态稳定控制效果的影响

图2给出了典型的紧急负荷调节过程中负荷变化情况。通过预期控制量 ΔP_L 和控制量峰值 ΔP_{max} 可计算超调量 $\sigma\% = \frac{\Delta P_{max} - \Delta P_L}{\Delta P_L}$ 来度量负荷调节过程中的超调情况, 通过 T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4 反映负荷调节控制响应的时延特性。下面分别分析上述参数变化对暂态稳定控制效果影响。

① 超调量 $\sigma\%$ 增大, 意味着余下群发电机节点自导纳减少量增加, 相当于图3中虚线上移, A_{dec3} 面积增加; 另外, 若 $T_2 \sim T_0$ 较小, 系统主导映象处于正向摆次时段, 其必将改善暂态稳定控制效果。不过, 超调量增加可能造成过控, 引发系统频率安全方面的问题。

② T_1 增大, 意味着紧急负荷调节欠控制的时间延长, 余下群发电机节点自导纳减少量持续小于预期目标; 考虑到实际情况, 至 T_1 时刻时系统主导映象通常还处于正向摆次时段, T_1 增大相当于图3中虚线在 T_0 至 T_1 阶段上升斜率下降, A_{dec1} 面积减少, 因此不利于改善暂态稳定控制效果。

③ T_2 增大, 保持时刻 T_1 和超调量 $\sigma\%$ 不变情况下, 意味着负荷超调阶段调节速度变慢, 余下群发电机节点自导纳虽持续减少, 但变化速率有所降低; 若 T_1 至 T_2 时段系统主导映象始终处于正向摆次时段, T_2 增大相当于图3中虚线在 T_1 至 T_2 阶段上升斜率下降, A_{dec3} 面积减少, 不利于改善暂态稳定控制效果; 而且, 随着 T_2 不断增加, 减速面积 A_{dec3} 也不断增大, 一旦导致系统主导映象首摆遇到FEP(首摆稳定最远点)并开始回摆时, 反而造成 $A_{dec} - A_{inc}$ 偏差增加, 使紧急负荷调节出现负效应现象, 反而恶化暂态反摆稳定。

④ T_3 增大: 保持超调量 $\sigma\%$ 和 T_2 不变的情况下, 若 T_3 增大但系统主导映象仍处于正向摆次时段, 则意味着图3中虚线所围减速面积 A_{dec3} 增加, 有利于

进一步改善暂态稳定控制效果。与 T_2 增大类似, T_3 增大同样可能导致反摆控制负效应。另外, 若前一阶段负荷调节已经出现过控, T_3 越大则意味着负荷调节的回调时间越长, 不利于后续过程的频率安全稳定。

3 仿真算例分析

在某实际工业企业电网, 区域1经3回220 kV线路(其中两回同杆架设)从区域2受电650 MW, 该电网负荷总量约为1 260 MW, 其中含照明、电弧炉等可中断负荷100 MW(区域1); 电解铝可控硅整流负荷640 MW(区域1); 高炉、精炼及厂用电等不可控负荷520 MW(区域1和区域2)。与常规负荷不同的是, 电解铝负荷具备快速调节能力, 允许紧急下调至最大负荷的50%甚至更低。

由于紧急负荷调节的控制效果与其调节特性参数密切相关, 首先通过一系列负荷阶跃试验, 获取电解铝控制系统的调节特性, 如图4所示。根据试验录波曲线的趋势线(图4中黑线)可整定相应的控制参数为: $\sigma\% = 50\%$, $T_1 = 0.3$ s, $T_2 = 0.8$ s, $T_3 = 1.8$ s。

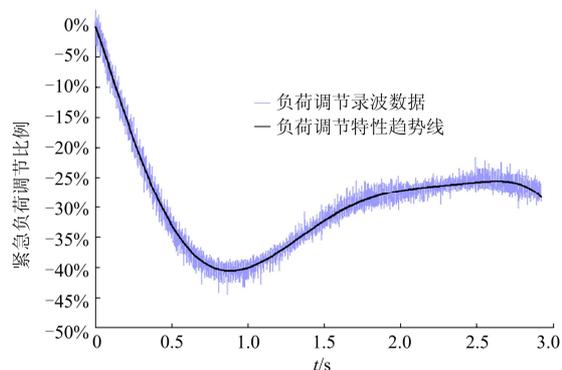


图4 实际电网电解铝负荷紧急调节实测试验曲线
Fig. 4 Real test curve of emergency regulation electrolytic aluminium load

3.1 紧急负荷调节控制有效性验证

(1) 场景1: 区域间送电断面同杆双回N-2故障
仿真试验结果表明, 该电网联络线一旦发生220 kV同杆双回N-2故障, 可能导致区域2内机组相对区域1内机组功角失稳。若采取送端紧急切机控制措施, 可能出现切机后送端机组等值惯量大幅下降, 临界群其他机组功角加速度增加的负效应; 即使切机降低临界群加速能量的正效应大于上述负效应, 也面临着因发电机组容量占全网负荷比例较大, 切机后全网频率快速跌落, 还需进一步采取切负荷控制措施的问题。

由EEAC理论可知, 送端切机和受端切负荷均

有利于提高暂态稳定首摆稳定性。同时,采取切负荷控制有利于保留全网发电机组惯量和发电机无功支撑能力,针对此类电网不失为一种解决暂态稳定的有利选择。受故障后剩余一回线热稳定和全网机组频率上升不得造成超速保护动作的双重限制,故障后至少需切除区域1负荷300 MW。可选措施如下:

- ① 切除照明、电弧炉等可中断负荷;
- ② 闭锁相应整流桥臂的触发脉冲实现紧急切除电解铝负荷;
- ③ 向电解铝控制系统下达紧急负荷调节命令,实施紧急负荷调节。

措施1的负荷可切量不足,需与其他负荷控制措施配合方能满足电网安全稳定需要;受电解铝工艺要求限制,执行措施2时仅能闭锁8组整流桥臂中的2n组($1 \leq n \leq 4$),按过切原则切负荷时,即使考虑措施1仍需闭锁4组整流桥臂,相当于切除320 MW电解铝负荷,不仅造成控制过量,也使得留网运行的电解铝整流桥无法继续正常工作而进入保温状态,可能造成重大生产事故和经济损失。

因此,考虑采取措施1和措施3的组合。根据图4所示的控制系统调节特性实测曲线,选择故障清除后0.1 s切除可中断负荷,同时令电解铝控制系统执行调节200 MW负荷指令,依据给定的频率安全稳定二元表([51.5 Hz, 1.0 s]、[52.0 Hz, 0.5 s]),仿真结束时FASTEST量化分析仿真软件给出的暂态功角稳定裕度为86.4%,频率安全稳定裕度为4.5%,表明采取紧急负荷调节可以满足安全稳定控制需要。

(2) 场景2: 区域1内一台大容量机组脱网

对装机规模相对有限的工业企业电网而言,一旦因机组升压变/送出线路短路或机组失磁故障导致机组脱网,可能造成全网频率快速跌落;区域间联络线传输无功功率大量增加导致受端(区域1)部分节点电压跌落,对高炉、精炼等电压敏感性负荷的正常运行造成影响。

仍采取措施1和措施3来应对机组脱网导致的频率失稳和电压跌落。通过与电解铝控制系统生产厂家协调,电解铝控制系统能够准确执行安控执行站多次发来的紧急负荷调节命令(包括故障触发的紧急负荷和轨迹触发的低频降负荷)。计及上述控制措施后的系统频率曲线如图5所示。

3.2 紧急负荷调节特性参数优化

为得到更优的控制效果,可优化整定相应的控制系统参数。以场景1为例,表1给出了不同的控制参数下,FASTEST量化分析仿真软件给出的暂态功角稳定裕度和暂态频率安全裕度,可以看出:

- ① 负荷紧急调节速度过快往往伴随着较大的

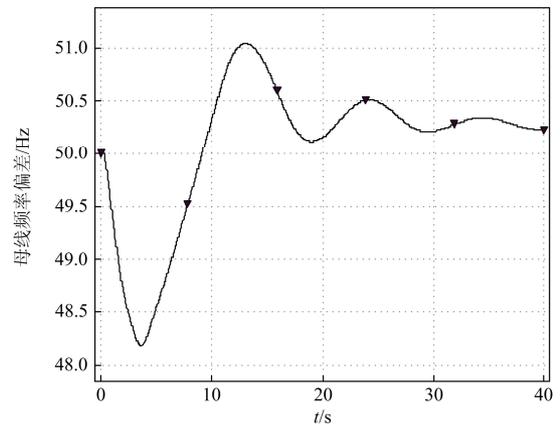


图5 一台机组脱网,计及紧急负荷调节控制后的频率曲线
Fig. 5 Frequency curve after generator trip-off considering emergency load regulation

表1 不同负荷调节控制方案下的系统暂态稳定裕度
Table 1 Transient stability margin of system under different load regulation control schemes

方案	$\sigma\%$	T_1/s	T_2/s	T_3/s	暂态功角稳定裕度	暂态频率安全裕度
1	50%	0.3	0.8	1.8	86.4%	5%
2	80%	0.1	0.6	1.1	92.2%	-0.2%
3	20%	0.6	0.8	1.0	80.3%	4.5%
4	50%	0.5	1.5	2.5	89.3%	3.0%

注: 方案2下暂态频率最高值超过52.0 Hz,可能引发机组超速保护动作。

控制超调,尽管有利于改善电网暂态功角稳定性,但容易导致控制过量且发电机调速系统来不及响应造成全网频率升高。

② 降低负荷紧急调节速度,控制系统的超调也可得到有效抑制。这虽有利于调节控制系统本身稳定性和发电机调节能力有充分释放,但却不利于紧急状态下电网功率快速平衡。

综合负荷调节控制后的电网暂态功角稳定裕度和暂态频率安全裕度,选择方案1为最终调节控制方案。

4 工程实施中要注意的问题

将紧急负荷调节作为安全稳定紧急控制措施,需注意以下问题。

① 获取真实的紧急负荷调节特性。结合生产工艺特点,以不影响正常生产流程为约束,确定可接受的紧急负荷调节幅度。通过实测,得到紧急负荷调节特性参数,包括图2所示的控制量峰值和时间参数(T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4)。对于负荷可调节幅度较大的情况,结合安全稳定紧急调节负荷控制量的需要,对

调控量进行分档, 分别进行调节特性的实测, 从而能够更准确地反映各种调节状态对安全稳定性的影响。

② 确定紧急负荷调节控制量。首先, 按切负荷控制的方式, 即不考虑紧急负荷调节特性的影响, 将控制量作为连续变量, 计算满足安全稳定约束的负荷控制量。然后, 结合实测的紧急负荷调节特性, 采用紧急负荷调节的控制方式, 分析校核负荷控制量的适应性, 根据需要对负荷控制量进行适当调整, 从而确定满足安全稳定要求的紧急负荷调节控制量。

③ 安控装置与负荷调节系统接口。安控装置与负荷调节系统建立信息交互机制, 一方面, 安控装置需要采集负荷调节系统的运行状态信息, 以及当前工况下负荷可调控的信息, 从而确定负荷的紧急调节能力; 另一方面, 安控装置将负荷控制量传送给负荷调节系统, 从而实施紧急负荷调节, 才能达到预期目的。

5 结语

电网中部分类型负荷具有快速、大幅度紧急调节能力, 将其用于电网紧急状态下的安全稳定紧急控制, 可弥补目前广泛应用的切负荷控制的某些不足, 丰富电网安全稳定紧急控制手段, 提高控制精细化程度, 最大限度地减少紧急控制对用户正常用电的影响程度, 改善电网面向用户的友好性。随着需求侧响应的发展, 深入研究负荷调节参与电网紧急控制具有更重要的意义, 特别是对于一些独立电网或微网, 采用紧急负荷调节, 有望解决安全稳定紧急控制措施难以有效实施的难题。

与切负荷控制相比较, 紧急负荷调节的控制效果与其固有的动态调节特性密切相关, 如果紧急负荷调节控制参数不合理, 可能会削弱控制效果甚至恶化系统暂态稳定性。因此, 在制定紧急负荷调节控制策略时, 需充分综合分析具体负荷参与紧急调节的动态特性及其对系统暂态稳定控制效果机理的影响, 优化整定控制参数, 才能充分发挥紧急负荷调节在安全稳定紧急控制中的积极作用。

参考文献

[1] 姚建国, 杨胜春, 王珂, 等. 智能电网“源-网-荷”互动运行控制概念及研究框架[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 1-6.
YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Concept and research framework of smart grid “source-grid-load” interactive operation and control[J]. Automation

of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 1-6.
[2] CALLAWY D S, HISKENS I A. Achieving controllability of loads[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 184-199.
[3] 杨楠, 王波, 刘涤尘, 等. 考虑柔性负荷调峰的大规模风电随机优化调度方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 231-239.
YANG Nan, WANG Bo, LIU Dichen, et al. Large-scale wind power stochastic optimization scheduling method considering flexible load peaking[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 231-239.
[4] 苏天诺, 邹明轩, 彭光强, 等. 基于统计综合法和三电平特性的高速动车组暂态负荷建模[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 257-262.
SU Tiannuo, ZOU Mingxuan, PENG Guangqiang, et al. Transient load modeling of high speed multiple units based on the statistical syntheses method and three-level characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 257-262.
[5] 夏成军, 杨仲超, 周保荣, 等. 考虑负荷模型的多回直流同时换相失败分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 76-81.
XIA Chengjun, YANG Zhongchao, ZHOU Baorong, et al. Analysis of commutation failure in multi-infeed HVDC system under different load models[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 76-81.
[6] 陈峰, 张建平, 黄文英, 等. 负荷模型对福建-华东联网暂态功角稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(21): 55-57.
CHEN Feng, ZHANG Jianping, HUANG Wenyong, et al. Study on the influence of load models on transient stability of interconnected systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(21): 55-57.
[7] 谢惠藩, 张尧, 夏成军, 等. 负荷特性对特高压紧急直流功率支援的影响[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 41-45.
XIE Huifan, ZHANG Yao, XIA Chengjun, et al. Impacts of load characteristics on the UHVDC emergency DC power support strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 41-45.
[8] 吕晓祥, 王建全. 电力系统暂态稳定预防控制算法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(20): 144-153.
LÜ Xiaoxiang, WANG Jianquan. A comprehensive review of the preventive control methodology for the improvement of transient stability in power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(20): 144-153.
[9] 周玲, 周野, 宋晓芳, 等. 基于参与因子的多源协调紧急控制方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(12): 53-59.

- ZHOU Ling, ZHOU Ye, SONG Xiaofang, et al. A coordinated emergency control method of multi-generators grid based on the participation factor[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(12): 53-59.
- [10] SYKES J, HU Yi. Design and testing of selected system integrity protection schemes (SIPS)[R]. IEEE PSRC Working Group C15, 2012.
- [11] 赵燕, 张文朝, 李轶群, 等. 电力系统通用安控策略整定方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 102-107.
- ZHAO Yan, ZHANG Wenchao, LI Yiqun, et al. Research on the general control strategy of power system tuning method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 102-107.
- [12] 王菲, 余贻鑫, 刘艳丽. 基于安全域的电网最小切负荷计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 28-33.
- WANG Fei, YU Yixin, LIU Yanli. Minimum load-shedding calculation approach based on the security region in the power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 28-33.
- [13] 中华人民共和国国务院令(第599号). 电力安全事故应急处置和调查处理条例[R]. 2011.
- [14] 李斌, 董金社, 李星桥, 等. 孤岛式微电网控制模式研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(2): 66-69.
- LI Bin, DONG Jinshe, LI Xingqiao, et al. Study on the control mode for islanded micro system network[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(2): 66-69.
- [15] 苏现征, 王娟娟, 赵闻蕾. 微电网研究现状及在铁道电气化中的应用[J]. 电器与能效管理技术, 2016(3): 26-29, 71.
- SU Xianzheng, WANG Juanjuan, ZHAO Wenlei. Present research situation of microgrid and application in railway electrification[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2016(3): 26-29, 71.
- [16] 杨欢, 赵荣祥, 辛焕海, 等. 海岛电网发展现状与研究动态[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 95-104.
- YANG Huan, ZHAO Rongxiang, XIN Huanhai, et al. Development and research status of island power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 95-104.
- [17] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论——非自治非线性多刚体系统的稳定性分析[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1999.
- [18] 徐泰山, 鲍颜红, 杨莹, 等. N-2 组合故障集的暂态功角稳定在线快速评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 122-126.
- XU Taishan, BAO Yanhong, YANG Ying, et al. Online fast transient angle stability assessment of N-2 contingency set[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 122-126.
- [19] 赵晋泉, 钱莉, 陈刚. 一种基于EEAC和轨迹灵敏度的暂态稳定约束最优潮流模型与方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 9-14.
- ZHAO Jinquan, QIAN Li, CHEN Gang. A novel EEAC and sensitivity based model and algorithm of transient stability constrained optimal power flow[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 9-14.
- [20] 谢惠藩, 张尧, 夏成军. 基于EEAC的紧急直流功率支援优化策略[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2008, 36(6): 127-132.
- XIE Huifan, ZHANG Yao, XIA Chengjun. Optimization strategy of emergency DC power support based on extended equal area criterion[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2008, 36(6): 127-132.
- [21] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [22] 任先成, 薛禹胜, WU Q H, 等. 低频低压切负荷的控制负效应及其机理[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 1-5.
- REN Xiancheng, XUE Yusheng, WU Q H, et al. Negative control effects of UFLS and UVLS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 1-5.

收稿日期: 2015-07-11; 修回日期: 2016-01-05

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

侯玉强(1983-), 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: houyuqiang@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 姜新丽)