

多直流异步互联系统中频率限制器的控制策略优化设计

高 琴¹, 陈亦平², 朱 林¹, 张 勇², 唐卓尧², 李崇涛³

(1. 华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510641; 2. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东省广州市 510623;

3. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省西安市 710049)

摘要: 云南电网通过多回直流输电系统和南方电网东部主网异步联网运行, 直流频率限制器 (frequency limit controller, FLC) 在送端系统频率控制中发挥重要作用。在楚穗直流单极闭锁试验中, 暴露了 FLC 与一次调频动作不匹配、直流输电系统长时间处于过负荷运行状态的问题。针对此问题, 建立 FLC 详细的数学模型, 通过 FLC 动态调节过程的分析, 阐明 FLC 不同模型的调节特征, 以及与一次调频的协调配合关系。在此基础上, 通过时域仿真法研究了 FLC 备用容量、死区设置对频率峰值和 FLC 调节量释放过程的影响, 提出 FLC 调频策略的优化设计方案, 并基于特征值灵敏度方法重新设计调速器参数, 优化其动态性能。采用所提方案能够充分发挥 FLC 对频率峰值的抑制作用, 同时与一次调频配合, 保证其调节量的快速释放, 实际运行结果验证了优化策略的有效性。

关键词: 异步联网; 频率特性; 直流频率限制器; 一次调频; 调频策略

0 引言

云南异步联网工程是南方电网化解交直流并联运行风险的一项重大工程。进入异步联网模式后, 大容量直流系统闭锁引发的功角稳定问题基本解决。但与此同时, 送端系统规模减小、转动惯量和本地负荷水平的降低也带来了频率失稳的风险^[1-2]。除常规频率调控手段外, 还应充分利用直流系统功率的快速可控性参与频率调节。

目前区域互联电网间通常采用直流功率紧急支援参与频率控制^[3-4], 但紧急功率支援由事件触发, 根据策略表改变直流输送功率, 依赖于复杂的稳控系统, 无法对频率进行实时连续调节。在直流频率控制中, 双侧频率调制一般用于提高交直流并联系统的阻尼特性; 直流频率限制器 (frequency limit controller, FLC) 则通常用来维持弱交流系统侧的频率稳定性。经综合比较, 在云南外送直流系统中启用了 FLC 参与送端频率调节。该功能的投入, 使得云南电网的频率特性与传统交直流互联系统产生显著差异。

对云南异步联网频率问题的研究, 多集中于运行网架转变引起系统风险的变化^[5]、高水电比例系统超低频振荡的机理分析与稳控措施^[6], 以及负荷

模型、调速器参数、高周切机措施等对云南电网频率稳定性的影响^[7-8], 未深入分析 FLC 的投入对云南电网频率动态特性的影响特征。

而对 FLC 的研究多见于直流孤岛系统的相关研究中。文献[9-10]分析指出, 采用 FLC 死区小于发电机一次调频死区的控制策略解决孤岛系统频率周期性振荡问题。文献[11]则分析了 FLC 在直流孤岛系统中不同工况下的运行特性以及与机组、安全控制等各方面的配合策略, 保证孤岛系统的稳定性。但上述分析局限于 FLC 的典型传递函数, 未涉及 FLC 实际控制逻辑与动作特性的分析。且异步运行方式下的云南电网与直流孤岛系统在送端系统规模、外送直流数量以及频率调控的复杂性上存在明显差异, FLC 在孤岛系统中的控制策略不能直接应用于云南电网。

云南异步联网后, 预防频率失稳的第一道防线即为一次调频和 FLC。因此本文将基于实际扰动案例, 分析 FLC 与一次调频的相互影响, 提出适用于异步运行方式的 FLC 应用策略, 为异步互联系统中 FLC 的策略设计提供理论基础和技术依据。

1 直流 FLC 的数学模型

考虑到直流的安全运行、维护需求, 以及对频率控制的需要, 要求 FLC 在大功率扰动下起到抑制频率峰值的作用且要避免频繁动作。为此, 在云南实

际系统的直流 FLC 中,采用“死区+无差调节+功率复归”的方法来抑制系统的大范围波动。直流 FLC 的控制逻辑分为两种:反向频差复归模型和积分负反馈复归模型。

1.1 反向频差复归模型

反向频差复归模型的控制逻辑如图 1 所示。

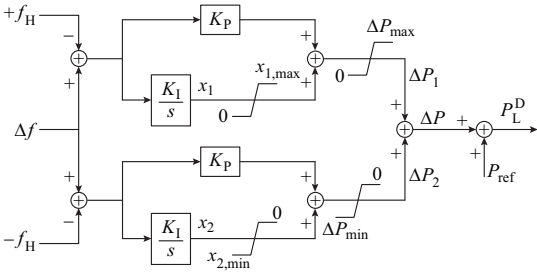


图 1 反向频差复归模型控制逻辑
Fig.1 Control logic of reverse frequency differential model

其中, $\Delta f = f - f_{ref}$ 为系统频差; $\pm f_H$ 为 FLC 死区; K_P 和 K_I 分别为比例和积分环节系数; ΔP_{min} 和 ΔP_{max} 分别为直流功率调制量下限和上限; ΔP 和 P_{ref} 分别为输出的直流功率附加调节量与直流功率参考值; x_i 为直流系统的状态量。

注意到,如果频差 Δf 总处于 FLC 死区以内,由于 x_1 和 x_2 的限幅使得 x_1 和 x_2 为 0。这样,由于 ΔP_1 和 ΔP_2 的限幅, ΔP_1 和 ΔP_2 也为 0。从而频差一直处于死区范围内时,直流系统的输出 $P_L^D = P_{ref}$ 。

当频差升高至 $\Delta f > +f_H$ 时,由于限幅的关系, Δx_2 和 ΔP_2 为 0,从而直流功率由下式确定:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = K_I(\Delta f - f_H) & 0 < x_1 < x_{1,max} \\ \Delta P_1 = K_P(\Delta f - f_H) + x_1 & 0 < \Delta P_1 < \Delta P_{max} \\ P_L^D = P_{ref} + \Delta P_1 \end{cases} \quad (1)$$

即 $\Delta f > +f_H$ 时, x_1 和 ΔP_1 将不断增大,从而直流功率 P_L^D 不断攀升。当频差回归至 $\Delta f < +f_H$ 时, FLC 输入的频差反向。

由式(1)可知, dx_1/dt 为负, FLC 进入复归环节,使得 x_1 不断减小至 0,直流功率恢复为 $P_L^D = P_{ref}$,该过程称为 FLC 的复归过程。频差降低到 FLC 反向死区时,由于限幅的关系, x_1 和 ΔP_1 为 0,式(1)中 x_1 和 ΔP_1 变为 x_2 和 ΔP_2 、 $-f_H$ 变为 $+f_H$,直流功率的变化过程同理可得。

1.2 积分负反馈复归模型

积分负反馈复归模型的控制逻辑如图 2 所示。

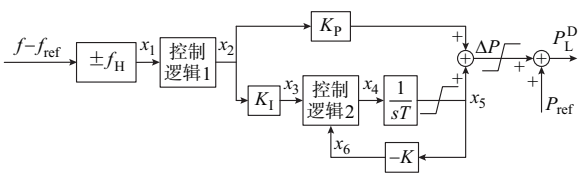


图 2 积分负反馈复归模型控制逻辑
Fig.2 Control logic of integrated negative feedback model

控制逻辑 1:当 $|x_1| \geq 0.005$ Hz,延时 100 ms 启动 FLC;当 $|x_1| < 0.005$ Hz,则强制输出 x_2 为零。

控制逻辑 2:当 $x_2 \neq 0$,选择信号 x_3 ;当 $x_2 = 0$,延时 60 s 选择信号 x_6 。

当频差升高至 $\Delta f > +f_H$,直流功率由下式确定:

$$\begin{cases} x_1 = \Delta f - f_H \\ T \frac{dx_5}{dt} = x_4 & \Delta x_{5,min} < \Delta x < \Delta x_{5,max} \\ x_6 = -Kx_5 \\ \Delta P = K_P x_2 + x_5 & \Delta P_{min} < \Delta P < \Delta P_{max} \\ P_L^D = P_{ref} + \Delta P \end{cases} \quad (2)$$

式中: T 为积分时间常数; K 为复归系数。

从而可见,当频率抬升且系统频差超出直流 FLC 正向死区时, FLC 延迟 100 ms 动作,控制逻辑 2 选择信号 x_3 ,使得 ΔP 不断增加,从而 P_L^D 不断抬升。当系统频差被抑制到 FLC 死区以内时,控制逻辑 2 延时 60 s 选择 x_6 作为其输入,引入负反馈环节, FLC 进入复归过程, x_5 不断降低至 0,使得 P_L^D 回归至 P_{ref} 。频率降低到 FLC 反向死区时,式(2)中 $-f_H$ 变为 $+f_H$,调节过程同理可得。

上述两种 FLC 控制逻辑分别沿用了 SIEMENS 和 ABB 的控制策略设计。目前云南电网外送高压直流系统中,有 4 回直流采用的是反向频差复归型 FLC,有 3 回直流采用的是积分负反馈复归型 FLC。

2 云南异步联网直流单极闭锁试验

2.1 FLC 的动态调节过程

2016 年 4 月 26 日 17:19:56 时,楚穗直流发生单极闭锁故障,闭锁极功率 2 500 MW,试验后云南电网频率最高为 50.41 Hz,云南电网频率及直流功率如图 3 所示。其中,直流 FLC 死区均设置为 0.1 Hz,反向频差复归模型中 K_P 和 K_I 为 0.3 和 0.222;积分负反馈复归模型中 K_P, K_I, T, K 分别为 0.6, 0.444, 10, 0.1。

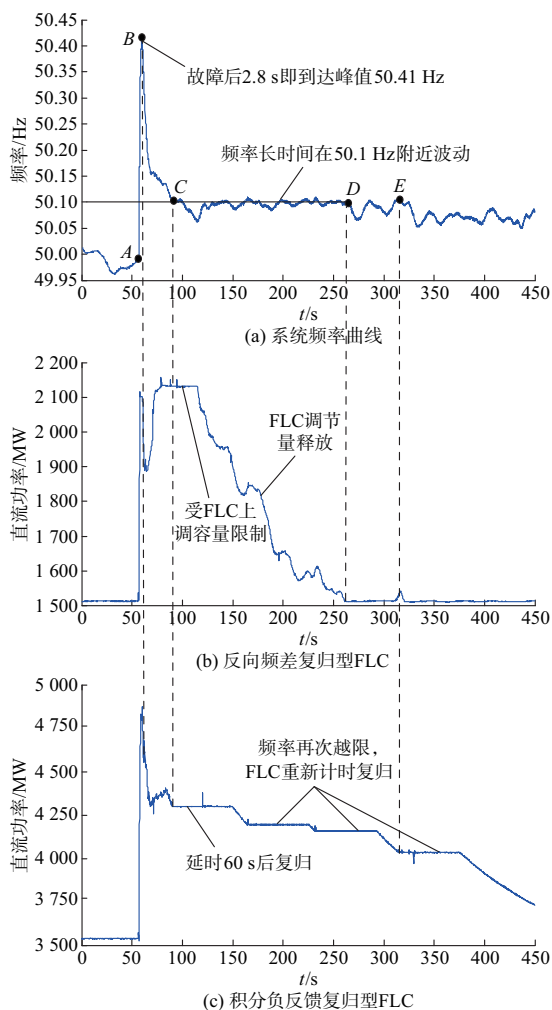


图3 频率及直流功率曲线

Fig.3 Curves of frequency and DC power

在 B 至 C 段,频率到达峰值后开始下降,FLC 由于输入信号 $\Delta f - f_H$ 减小,调节量中比例分量跟随频差减小,积分分量随时间增加。由于调速器调节缓慢,FLC 积分分量持续累积,调节量再次上升,将频率限制到 50.1 Hz。

C 至 D 段为反向频差复归型调速器的功率复归过程。由于直流 FLC 调节速度快,可跟随频率的变化迅速改变调节量,因此在复归过程中,调速器调节的机组出力将全部用于直流 FLC 调节量的释放,系统频率维持在 50.1 Hz 附近。

积分负反馈复归型 FLC 在频差恢复至 FLC 死区后立即进入延时阶段,在 C 至 E 段,由于调速器不能及时调节机组出力,频差多次越过 FLC 死区,引起积分负反馈复归型 FLC 反复中断复归过程,直流长时间运行于过负荷状态。

2.2 FLC 与调速器的协调配合关系

由上述分析可知,在投入 FLC 功能的多直流异

步送出系统中,功率大扰动后的动态过程可以简述为:FLC 快速输出调节量,将系统频差限制至 FLC 死区附近,调速器响应频差调节的机组出力将优先释放 FLC 调节量,然后恢复频率至准稳态。

在 C 至 D 段对一次调频而言,相当于调速器基于频差的阶跃扰动响应。根据调速器有差调节特性,对固定的频差 Δf_0 ,一次调频能够输出的总调节量为:

$$\Delta P_M = \frac{\Delta f_0}{B_P} \quad (3)$$

式中: B_P 为一次调频的调差系数。一次调频的响应速度则与调速器比例-积分-微分(PID)参数相关。

因此 FLC 死区的设置决定了一次调频备用的有效容量,而机组调速器 PID 参数决定了备用调用速度。若因 FLC 死区过小导致一次调频的调节量受限,或者因调速器参数调整导致响应过慢,在高频问题下都将引起 FLC 长期运行于过负荷状态,不利于设备安全。从设备可靠性方面考虑,需要加快频率恢复以释放 FLC 调节量。

3 FLC 应用策略优化

由于 FLC 比例、积分及时间常数按照工程经验设置初值,通过实验试凑法调整,并经直流工程调制的验证^[12],相同模型采用统一控制参数,工程应用中基本不做调整。因此本文仅对 FLC 备用安排、死区配合、与调速器的协调配合策略做优化分析。

3.1 暂态频率控制要求

3.1.1 暂态频率偏移限值

从系统安全角度考虑,应满足《电力系统安全稳定导则》的规定,即发生最大 $N-1$ 故障时,系统应保持频率稳定且不导致低频减载^[13];同时考虑到异步运行方式下云南电网直流闭锁引起的高频问题,在发生最大 $N-1$ 故障时,还应保证高频切机不动作。

目前,云南电网低频减载第 1 轮定值为 49.0 Hz,高频切机第一轮定值为 50.8 Hz^[7]。为保证最大 $N-1$ 故障下,低频减载与高周切机可靠不动作,暂态频率偏移限值应留有一定裕度,即要求异步运行方式下,云南电网最低频率不低于 49.2 Hz,最高频率不高于 50.6 Hz。

3.1.2 暂态恢复频率

目前国内对暂态恢复频率的要求为:一次调频作用后的稳态频差的允许值为 ± 0.2 Hz。而 FLC 参与调频后,会快速将系统频差抑制在其死区以内。因此对异步运行方式下的云南电网而言,要求一次调频动作后,系统暂态稳定频率恢复至

($50 \pm f_H$) Hz, 并释放全部直流 FLC 的调节量, $\pm f_H$ 为 FLC 的死区。

3.2 FLC 的备用安排

合理安排 FLC 备用能够充分发挥 FLC 对频率峰值的抑制作用。采用 2017 年夏天极限方式数据进行仿真分析, 每回直流 FLC 备用容量从 0 开始每次增加 100 MW, 备用达到直流额定容量的 20% 停止增加, 并设置楚穗直流单极闭锁 2 500 MW 进行 $N-1$ 校验, FLC 不同备用容量下, 系统的频率曲线对比见附录 A 图 A1。

在 1 400 MW 的备用容量下, 系统频率峰值为 50.43 Hz, 已经能够满足暂态频率偏移限值的要求, 保证云南高频切机可靠不动作。备用容量达到 2 100 MW 及以上时, 对进一步抑制频率峰值作用明显减弱。

因此, 在实际运行中, 考虑一定裕度(直流故障极不能提供上调容量、热稳定限制等)以及直流的经济运行, 建议云南外送所有运行直流 FLC 应按其额定容量设置 2 000 MW 左右的备用容量, 对更大的扰动功率需结合稳控措施实现对频率峰值的抑制。

3.3 FLC 的死区设置策略

1) FLC 死区的确定

FLC 的死区设置需要综合考虑频率峰值的控制和调节量的释放过程。对 FLC 死区设置进行仿真分析, FLC 死区从 ± 0.1 Hz 开始逐渐增加, 并进行最大 $N-1$ 校验。FLC 不同死区下, 云南电网频率峰值以及 FLC 复归时间(频差返回到 FLC 死区内, 且所有直流 FLC 调节量复归完毕)见附录 B 图 B1。

直流 FLC 死区与系统频率峰值基本呈线性关系, 死区从 0.1 Hz 增加到 0.14 Hz, 频率峰值仅增加 0.03 Hz。而不同死区对 FLC 复归时间影响非常大, 在 ± 0.1 Hz 死区下, 一次调频调节量受限, 无法释放全部的直流 FLC 调节量。在死区增加到 ± 0.14 Hz 时, FLC 复归时间在 1 min 左右, 继续增加 FLC 死区对减小复归时间作用不大, 反而会增加系统的频率峰值。因此经综合考虑, FLC 死区设置在 $\pm 0.14 \sim \pm 0.16$ Hz 较为合适。

2) 多死区协调配合策略

在云南电网实际运行中, 从降损角度考虑, 外送功率通常优先安排特高压直流送出。相比高压直流, 特高压直流向上调节空间小, 且设备对绝缘要求高, 其过负荷能力安全约束较多。在发生大功率扰动后, 通常需要在短时间内迅速释放调节量, 恢复正常运行状态。

由于死区对 FLC 调节量的复归存在显著影响,

可通过设置差异化死区来实现多回直流 FLC 间的协调配合。即对过负荷运行条件要求严格的直流, 如楚穗和普侨两条特高压直流条件, 将 FLC 死区设置大于其他直流, 即可实现其调节量的优先释放, 充分利用其他直流的过负荷能力。

3.4 调速器动态性能优化

在同步联网时, 云南电网的水电机组调速器采用并网参数, 动态性能优良, 在频差超出一次调频死区后, 正常在 30 s 以内即动作完毕^[14]。而异步运行方式下, 为了抑制调速器参数不稳定引起的超低频振荡问题, 将调速器参数调节为孤岛参数^[15], 一次调频响应慢、调节周期长。为了改善调速器动态性能, 需要在保证稳定性的基础上对调速器参数进行优化^[16], 具体优化过程如下。

1) 目标

考虑详细的水轮机调速闭环系统, 求其阶跃响应函数, 以机组一次调频动作至稳态值的 80% 所需时间最短为目标。

2) 约束条件

调速器参数需保证每台机组向系统提供正阻尼, 同时调速器参数需在合理的范围内。

3) 特征值灵敏度方法求解

根据所关心的超低频振荡模式下特征值相对于每台机组调速系统 PID 参数的灵敏度的大小和正负, 以单机阶跃响应时间最快为目标、阻尼比 $\xi > 0$ 为约束条件, 进行迭代计算。

根据所提方法, 对云南电网主要水电厂机组调速器参数进行优化, 受篇幅限制, 这里仅列出 3 个电厂优化前后的参数及响应时间对比如表 1 所示。

表 1 参数优化前后响应情况
Table 1 Corresponding situation before and after parameter optimization

电 厂	PID 原参数			优化前响 应时间/s	PID 优化参数			优化后响 应时间/s
	K_P	K_D	K_I		K_P	K_D	K_I	
A	2	1	0.370	180	1.55	2	0.50	130
B	2	1	0.375	250	2.00	2	0.50	130
C	2	1	0.630	150	2.85	2	1.10	100

采用优化参数在 2017 年各种运行方式下进行频域与时域验证, 超低频振荡模式的阻尼均能满足工程要求。由此可知, 本文所提优化方法, 在满足系统稳定性的前提下, 能够明显减小调速器响应时间, 使其动态性能得到优化, 加速系统频率的恢复。

4 实际运行效果

2017 年 7 月 31 日普侨直流系统发生单极闭锁, 闭锁极功率 2 500 MW, 系统频率及直流功率的

动态过程如图 4 所示。

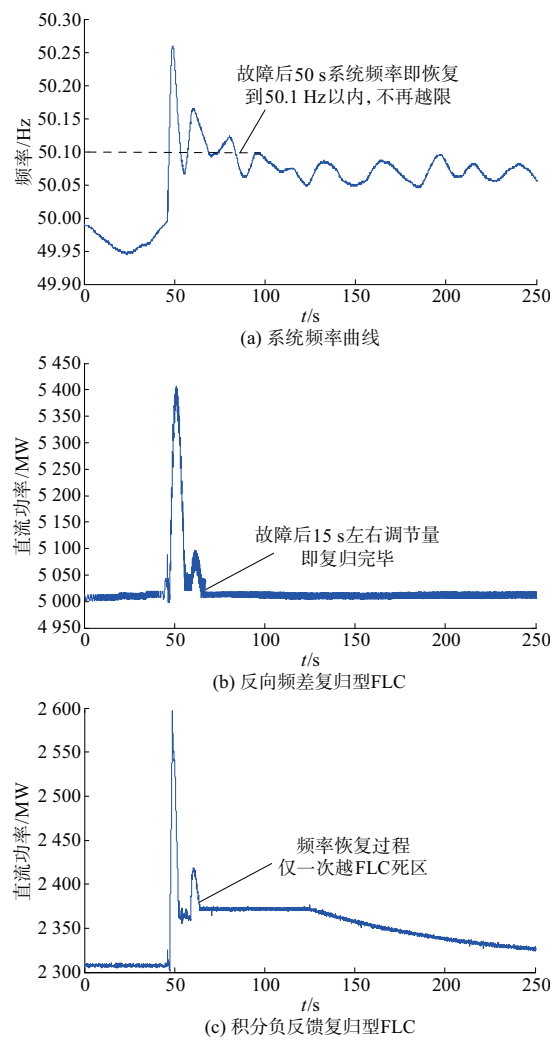


图 4 优化后 FLC 动作特性
Fig.4 Operating characteristics of FLC after optimization

由图 4 可知,异步联网后,在云南电网开展上述优化工作后,直流闭锁后的动态过程显著改善,频率质量达到较高的控制水平。

5 结论

本文以云南异步联网为背景,研究了 FLC 的调频特性及应用策略,主要结论如下。

1)分析了大功率扰动下 FLC 与一次调频的动态调节过程。结果表明,在大功率扰动下 FLC 将优先承担扰动功率,显著降低频率峰值;随后由调速器调节机组功率释放 FLC 调节量。且 FLC 死区一定程度上决定了一次调频备用的有效容量,而机组调速器 PID 参数决定了一次调频备用的调用速度,从而直接影响 FLC 的复归快慢。

2)基于 FLC 与一次调频的协调配合关系,结合

暂态频率控制要求,综合考虑频率稳定限制、控制效果以及直流经济运行,提出了 FLC 备用安排、死区配合方案,以及调速器参数优化方法,并投入实际运行,取得了良好的运行效果。

为减少送受端的相互影响,简化协调配合策略,目前仅投入了直流送端的 FLC 功能。南方电网东部主网作为多直流馈入的受端电网,如何发挥 FLC 对受端系统的功率支援作用,协调好送受端的相互影响将在后续研究中展开。

本文由南方电网公司科技项目 (ZDKJXM20160001)资助,特此感谢!

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] FAIRLEY P. Why southern China broke up its power grid[J]. IEEE Spectrum, 2016, 53(12): 13-14.

[2] ZHOU H, SU Y, CHEN Y, et al. The China southern power grid: solutions to operation risks and planning challenges[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2016, 14(4): 72-78.

[3] 艾鹏,滕子非,王晓茹,等.计及紧急直流功率支援的扰动后稳态频率预测算法[J].电力系统自动化,2017,41(13):92-99.DOI: 10.7500/AEPS20160706011.

AI Peng, TENG Yufei, WANG Xiaoru, et al. Prediction algorithm of steady frequency after disturbances considering emergency DC power support[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 92-99. DOI: 10.7500/AEPS20160706011.

[4] 许涛,励刚,于钊,等.多直流馈入受端电网频率紧急协调控制系统设计与应用[J].电力系统自动化,2017,41(8):98-104.DOI: 10.7500/AEPS20160826007.

XU Tao, LI Gang, YU Zhao, et al. Design and application of emergency coordination control system for multi-infeed HVDC receiving-end system coping with frequency stability problem [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 98-104. DOI: 10.7500/AEPS20160826007.

[5] 周保荣,洪潮,金小明,等.南方电网同步运行网架向异步运行网架的转变研究[J].中国电机工程学报,2016,36(8):2084-2092.

ZHOU Baorong, HONG Chao, JIN Xiaoming, et al. Study of backbone structure change from synchronous to asynchronous in China Southern Power Grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2084-2092.

[6] 王官宏,于钊,张怡,等.电力系统超低频率振荡模式排查及分析[J].电网技术,2016,40(8):2324-2330.

WANG Guanhong, YU Zhao, ZHANG Yi, et al. Troubleshooting and analysis of ultra-low frequency oscillation mode in power system[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2324-2330.

[7] 周磊,张丹,刘福锁,等.异步联网后云南电网的频率特性及高频切机方案[J].南方电网技术,2016,10(7):17-23.

ZHOU Lei, ZHANG Dan, LIU Fusuo, et al. Frequency

characteristics of Yunnan power grid and corresponding over frequency generator tripping scheme after asynchronous interconnection[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(7): 17-23.

[8] 杜斌,张丹,张军民,等.异步联网后云南电网的稳定特性与控制措施[J].南方电网技术,2016,10(7):13-16.

DU Bin, ZHANG Dan, ZHANG Junmin, et al. Stability characteristics and control measures of Yunnan power grid after asynchronous interconnection [J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(7): 13-16.

[9] 陈亦平,程哲,张昆,等.高压直流输电系统孤岛运行调频策略[J].中国电机工程学报,2013,33(4):96-102.

CHEN Yiping, CHENG Zhe, ZHANG Kun, et al. Frequency regulation strategy for islanding operation of HVDC [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 96-102.

[10] 贺静波,张剑云,李明节,等.直流孤岛系统调速器稳定问题的频域分析与控制方法[J].中国电机工程学报,2013,33(16): 137-143.

HE Jingbo, ZHANG Jianyun, LI Mingjie, et al. Frequency domain analysis and control for governor stability problem in islanded sending systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 137-143.

[11] 王华伟,韩民晓,范园园,等.呼辽直流孤岛运行方式下送端系统频率特性及控制策略[J].电网技术,2013,37(5):1401-1406.

WANG Huawei, HAN Minxiao, FAN Yuanyuan, et al. Sending end frequency characteristic under islanded operation mode of HVDC transmission system from Hulun Buir to Liaoning and corresponding control strategy[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1401-1406.

[12] 杜斌,柳勇军,涂亮,等.糯扎渡直流频率限制控制器研究[J].南方电网技术,2013,7(5):27-31.

DU Bin, LIU Yongjun, TU Liang, et al. Study on the frequency limit control of Nuozhadu DC transmission project

[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(5): 27-31.

[13] 林勇,陈筱中,郑秀波,等.电力系统旋转事故备用容量的配置研究[J].电力系统自动化,2014,38(19):114-121. DOI: 10.7500/AEPS20131205002.

LIN Yong, CHEN Xiaozhong, ZHENG Xiubo, et al. Estimation of spinning contingency reserve capacity in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 114-121. DOI: 10.7500/AEPS20131205002.

[14] 水轮机调节系统并网运行技术导则[M].北京:中国电力出版社,2013.

[15] 张建新,刘春晓,陈亦平,等.异步联网方式下云南电网超低频振荡的抑制措施与试验[J].南方电网技术,2016,10(7):35-39.

ZHANG Jianxin, LIU Chunxiao, CHEN Yiping, et al. Countermeasures and experiments on ultra-low frequency oscillation of Yunnan power grid in asynchronous interconnection mode[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(7): 35-39.

[16] MO W, CHEN Y, CHEN H, et al. Analysis and measures of ultra-low-frequency oscillations in a large-scale hydropower transmission system[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(99): 1-8.

高 琴(1992—),女,硕士研究生,主要研究方向:电力系统稳定与控制、直流输电技术。E-mail: gaoq_scut@163.com

陈亦平(1978—),男,通信作者,博士,教授级高级工程师,主要研究方向:电力系统稳定与控制。E-mail: chenyping@csg.cn

朱 林(1979—),男,副教授,主要研究方向:电力系统稳定与控制、直流输电技术。E-mail: zhul@scut.edu.cn

(编辑 鲁尔姣)

Strategy Design of Frequency Limit Controller on Multi-HVDC Asynchronous Interconnected Power System

GAO Qin¹, CHEN Yiping², ZHU Lin¹, ZHANG Yong², TANG Zhuoyao², LI Chongtao³

- (1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;
- 2. China Southern Grid Power Dispatching and Control Center, Guangzhou 510623, China;
- 3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Yunnan power grid asynchronously interconnects with the main grid of China Southern Power Grid by multiple high voltage direct current (HVDC) transmission systems, and the frequency limit controller (FLC) plays a significant role in the frequency control of sending-side system. In the HVDC single-polar block experiment, which is called Chuhui DC system, some HVDC transmission lines operate in an overloaded mode for a long time because of the mismatching between FLC and primary frequency control (FPC). By analyzing the dynamic regulation process of the FLC, regulatory characteristics of different models of the FLC and the coordinated cooperation relationship with primary frequency regulation are clarified. On the basis of that, the paper analyzes the influence of FLC reserve capacity, dead band on the frequency peak and releasing process of FLC by time domain simulation and a frequency modulation strategy of FLC is proposed. Furthermore, the governor parameters are redesigned by eigenvalue sensitivity method for improving the dynamic performance of FPC, which can make the best of FLC on frequency peak restriction and cooperate with primary frequency regulation in the meanwhile to guarantee the rapid release of its adjustment. The results of operation show the availability of proposed strategies.

Key words: asynchronous interconnection; frequency characteristics; frequency limit controller; primary frequency control; frequency regulation strategy