

基于功率灵敏度的等值机出力定向调整策略

夏成军¹, 华 夏¹, 李 清²

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640;

2. 中国南方电网超高压输电公司 检修试验中心, 广东 广州 510663)

摘要:在校验动态等值前后一致性时发现等值前后由于平衡机出力变化会导致发生初始功角偏移的现象, 针对该现象, 分析了平衡机出力变化的原因和功角偏移的机理, 提出一种基于功率灵敏度的等值机出力定向调整策略。在线路潮流控制量约束和机组出力调控量约束的基础上, 确定节点的功率调整量, 根据灵敏度的大小和线路潮流偏差的大小提出控制节点的选取原则。从控制节点和相应调整量的确定上保证等值前后线路潮流偏差在要求的范围内, 并通过等值机出力的定向调整实现消除平衡机功角差的目的, 同时给出了相应的调整步骤和实现的策略流程。以南方电网某年度方式数据为例, 验证了所提调整策略的正确性和有效性。

关键词:动态等值; 初始功角偏移; 功率灵敏度; 调整策略; 电力系统

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.02.018

0 引言

在研究大规模交直流系统之间相互作用特性时, 为减少数值仿真计算量, 通常采取动态等值的方法对系统进行简化分析^[1-3]。通过对复杂电力系统进行有效的动态等值, 用等值系统代替原始系统, 应用 RTDS 或 EMTDC 等工具对等值后的系统进行电磁暂态仿真研究, 可极大地节省仿真时间, 提高仿真效率。为满足动态性能的要求, 需要保证等值前后保留机组的转子摇摆曲线基本一致(包括幅值、频率、相位、衰减趋势等)^[4]。某次在校核发电机转子摇摆曲线时发现平衡机初始功角发生偏移, 其摇摆曲线整体向上/下偏移, 但故障时的动态响应变化趋势仍保持一致, 对比分析发现等值前后平衡机的初始有功出力发生了改变。因此消除平衡机的初始功角差需要从机组出力调整的角度出发, 以使得等值前后其出力基本相同。

平衡节点作为松弛节点, 在常规潮流计算中不会关注其出力大小, 但在动态等值中平衡机作为系统的保留部分, 与其他保留的发电机并没有实质性的区别, 因此需要考虑调整平衡机出力, 以保证等值前后平衡机的功角摇摆特性基本相同。目前, 调整发电机出力的方法^[5-13]大多是针对有功安全校正以及提高系统稳定裕度问题而言的。文献[6]基于灵敏度的物理意义, 提出了一种反向配对等量调整的方法消除线路过载。文献[7-8]利用综合灵敏度的概念调整机组出力, 考虑了节点对过载线路和接近极限线路的共同作用。在文献[9-10]的调整过程中, 考虑到平衡机可能是具有最佳减载效果的发电

机组, 使平衡机参与调节。文献[11-13]基于灵敏度分析优化发电机的有功出力, 以提高系统的电压稳定裕度。在这些研究中, 无论是消除线路过载, 还是确定发电机的最优出力, 都是从灵敏度的角度出发, 考虑节点出力与线路功率的关系, 按照一定的原则调整机组出力以达到研究目的。灵敏度类方法因其简单、实用、物理概念清晰且计算效率高, 被广泛应用于发电机组出力的调整过程中, 而目前专门针对等值后平衡机出力的调整尚未有文献研究。

由于平衡机的出力不可控, 消除平衡机的初始功角偏移问题时, 不能直接调整平衡机的出力, 需要通过调整等值区域内的机组出力间接地改变平衡机的出力, 进而使得初始功角回到等值前指定的初始运行点, 同时维持其他保留发电机的转子摇摆特性在等值前后一致。为保证等值后系统的特性变化较小, 必须严格地限制系统中线路潮流分布和各发电机出力大小, 因此在调整过程中不能简单地改变某台或某几台发电机的出力, 需要在考虑这些约束的前提下按照一定的原则调整出力。调整平衡机初始功角, 保证等值前后初始运行点基本一致, 对于后期通过仿真研究分析电力系统的行为具有重要意义。

针对该问题, 本文提出一种基于功率灵敏度的等值机出力调整方法, 利用功率灵敏度反映控制节点出力变化对线路功率变化的影响, 根据线路潮流控制量约束以及发电机出力可调量约束确定节点的功率调整量, 按照一定原则选取控制节点, 通过调整控制节点的出力改变平衡机出力, 有效解决了平衡机初始功角偏移问题, 同时保证了等值前后潮流偏差控制在指定范围内, 以满足动态等值性能的要求。

1 等值前后平衡机功角变化的机理分析

在电力系统潮流计算未得出结果前, 系统中的

收稿日期: 2018-06-15; 修回日期: 2018-11-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51577071)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577071)

网损是未知的,因此系统中至少存在一个含电源节点的功率是不能确定的,这个节点最后要承担功率平衡的任务,称该节点为平衡节点。考虑到系统不平衡功率可能较大的情况,潮流计算中通常选用多台平衡机组共同承担系统中的不平衡功率,以使得潮流计算的结果更加符合实际情况^[14]。平衡节点的另一个作用是作为参考节点,将其电压相角设为 0,在多平衡节点潮流计算中,会指定其中一个平衡节点为参考节点。本文考虑更为一般的情况,设其电压相角为 φ 。

等值前后平衡机的出力发生变化的原因可能是:等值后整个系统的无功分布发生了一定的变化,导致系统网损发生改变;多平衡机潮流计算中系统的不平衡功率按照一定的比例分配给平衡机群中的各平衡发电机^[15],而等值过程中系统的平衡机数量可能会减少,部分平衡机与其他机组合成一台等值机,使得所保留平衡机各自分担的不平衡功率也会发生改变;计算过程中线路有功潮流误差的累积,也会造成平衡机的出力发生较大的改变。正是由于平衡机出力的变化,导致发生初始功角偏移的现象。下面分析发电机有功出力变化对功角的影响。

在稳定计算之前通过潮流计算得出系统扰动前的运行状态,包括各节点的电压、注入功率以及线路潮流等,再根据这些稳态值计算出微分方程求解所需的初值(包括发电机转子角、暂态电势、机械功率等)。图 1 为同步发电机稳态运行相量图。图中忽略了定子绕组电阻,即认为定子为纯感性, xy 坐标系为系统同步旋转参考坐标系, q 轴与 x 轴的夹角即为发电机的功角 δ 。

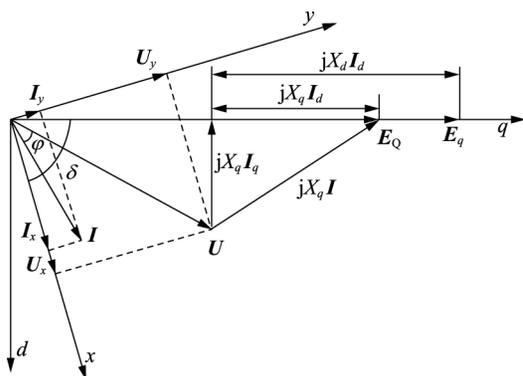


图 1 发电机稳态相量图

Fig.1 Phasor diagram of generator in steady state

通过潮流计算得出扰动前发电机稳态运行情况下的端电压和输出功率的表达式分别如下:

$$U_{i(0)} = U_{ix(0)} + jU_{iy(0)} \quad (1)$$

$$\tilde{S}_{(0)} = P_{(0)} + jQ_{(0)} \quad (2)$$

其中, $U_{ix(0)}$ 、 $U_{iy(0)}$ 分别为端电压的 x 、 y 轴分量。

则由此可得出发电机注入网络的电流初值为:

$$I_{i(0)} = I_{ix(0)} + jI_{iy(0)} = \tilde{S}_{(0)}^* / U_{i(0)}^* \quad (3)$$

根据图 1,发电机的虚构电势为:

$$E_{Q(0)} = E_{Qx(0)} + jE_{Qy(0)} = U_{i(0)} + jX_q I_{i(0)} \quad (4)$$

稳态运行时,系统中各节点的电压均在额定值附近,其值约等于 1 p.u.,结合式(1)~(4),可得:

$$E_{Qx(0)} = -X_q U_{iy(0)} P + X_q U_{ix(0)} Q + U_{ix(0)} \quad (5)$$

$$E_{Qy(0)} = X_q U_{ix(0)} P + X_q U_{iy(0)} Q + U_{iy(0)} \quad (6)$$

则发电机功角初始值为:

$$\delta_{(0)} = \arctan(E_{Qy(0)} / E_{Qx(0)}) = \arctan \frac{X_q U_{ix(0)} P + X_q U_{iy(0)} Q + U_{iy(0)}}{-X_q U_{iy(0)} P + X_q U_{ix(0)} Q + U_{ix(0)}} \quad (7)$$

等值前后平衡机出力的变化主要表现在其有功出力的变化,且等值前后系统各节点的电压基本一致。由式(7)可知,发电机的初始功角与发电机有功功率有关,若等值后系统平衡机的有功出力增加,式(7)第二个等号右侧的分子会增大,分母会减小,整个分数值会增大,则初始功角 $\delta_{(0)}$ 便会增大,反之亦然。动态等值过程中保留的发电机属于研究系统,等值机是由外部系统的同调发电机群聚合而成,其额定容量一般都很大,因此可通过调整等值机的出力间接改变平衡机的出力,消除初始功角差,以保证等值前后发电机的功角摇摆曲线一致。

2 功率调整量及控制节点的选取

2.1 功率灵敏度

灵敏度的计算利用了快速分解法中的矩阵 B' 及直流潮流公式^[6]:

$$\begin{cases} B' \Delta \theta = \Delta P \\ \Delta P_L = \Delta \theta_L / x_L \\ S_{Li} = \Delta P_L / \Delta P_i \end{cases} \quad (8)$$

其中,下标 L 、 i 分别表示支路和机组编号; x_L 为支路 L 的电抗; ΔP_L 为支路 L 的有功功率变化量; $\Delta \theta_L$ 为支路 L 首末端的相位差; S_{Li} 为机组 i 对支路 L 的功率灵敏度。 S_{Li} 的物理意义是当机组 i 有功增加 1 个单位、平衡机有功出力减少 1 个单位时支路 L 有功功率的变化量。可以看出,机组 i 对支路 L 的灵敏度不仅仅是机组 i 的出力增加引起支路 L 的潮流变化量,而是综合反映了控制机组和平衡机出力变化对线路潮流的叠加作用。灵敏度绝对值的大小反映了节点出力变化对线路潮流变化的影响程度,灵敏度为正时表示节点出力增加会使得线路的潮流增加,灵敏度为负时表示节点出力增加会使得线路潮流减少,平衡机的灵敏度为 0。

2.2 控制节点的选取

在大规模电网的动态等值过程中,绝大多数机组都被同调聚合合成等值机组,仅有少数的机组被保

留,等值前后保留机组性能的一致性说明了动态等值的合理性和有效性。在调整出力时控制节点应选取为出力可调的等值机组,若要使平衡机的出力减少,为尽快转移出力,应增加控制节点的出力,对于某些当前出力已达上限的发电机组,其出力不可调;同理,若要增加平衡机出力,当前出力已达出力下限的发电机组其出力不可调。将这些出力可调的等值机节点记为控制节点集合 J_c 。

等值前后线路潮流存在一定的偏差,部分线路偏差可能较大。为了避免调整过程中线路的潮流偏差进一步扩大,本文在选取控制节点时遵守以下原则:在每轮调整中,搜索潮流偏差最大的线路 k ,计算所有可调节节点对该线路的灵敏度,找出灵敏度绝对值最大的且出力调整方向有利于减小该线路潮流误差的可调节节点作为控制节点,这样可以在调整的过程中修正潮流偏差最大的线路。

2.3 功率调整量的计算

若要改变平衡机组的出力,消除等值后平衡机初始功角偏移的问题,需要通过调整其他等值机组的出力大小间接改变平衡机的出力。但是调整了等值机的出力后,必然会引起部分线路潮流的改变。为确保等值前后系统潮流偏差在给定范围内,不能简单地调整机组出力,需要考虑到调整前后线路潮流的变化以及变化后的等值系统与原始系统线路潮流偏差大小是否满足等值要求,因此,必须对功率调整量加以一定的限制。

调整的最终目标是使平衡机在等值前后出力差的绝对值尽可能达到最小,即:

$$\min |P'_{Gr} - P_{Gr}| \quad (9)$$

其中,下标 r 表示平衡机; P'_{Gr} 为调整后的平衡机出力; P_{Gr} 为等值前平衡机的出力。

搜索出系统中等值前后潮流偏差最大的线路 k ,根据 2.2 节选取控制节点 $i \in J_c$,调整节点 i 出力的同时使得线路 k 的潮流偏差降低,尽量使得等值前后潮流偏差控制在所要求的范围内,则调整量应满足:

$$\Delta P_{k0} - S_{ki} \Delta P_{Gi-k} = \sigma_k P_{k0} \quad (10)$$

$$\Delta P_{Gi-k} = (\Delta P_{k0} - \sigma_k P_{k0}) / S_{ki} \quad (11)$$

其中, S_{ki} 为节点 i 对线路 k 的灵敏度绝对值; ΔP_{Gi-k} 为根据线路 k 得到的节点 i 的功率调整量; ΔP_{k0} 为调整前线路 k 的潮流偏差; P_{k0} 为等值前系统线路 k 的功率; σ_k 为给定的精度系数。

为了避免在调整过程中潮流偏差较小的正常线路 m 功率变化太大,需要对控制节点的出力调整量进行限制,假设要求调整前后线路潮流变化在 $\pm \eta$ 内,则调整量不能超过:

$$\Delta P_{Gi-m} = \eta P_m / S_{mi} \quad (12)$$

其中, P_m 为线路 m 的功率; S_{mi} 为节点 i 对线路 m 的

灵敏度绝对值; ΔP_{Gi-m} 为根据线路 m 得到的节点 i 的功率调整量,下文中类似。

为了保证在调整过程中所有正常线路的潮流变化都在限定的要求内,需要确定最小的调整量约束如下:

$$\Delta P_{Gi-\min} = \min \{ \Delta P_{Gi-m1}, \Delta P_{Gi-m2}, \dots \} \quad (13)$$

调整过程中要考虑当前平衡机出力 P''_{Gr} 与等值前实际出力 P_{Gr} 之间的差值,控制节点 i 的调整量不应超过该功率差值的绝对值,以避免调整过度,即不超过:

$$\Delta P_{Gi-r} = |P''_{Gr} - P_{Gr}| \quad (14)$$

同时,发电机 i 的可增减出力大小还受其自身调节范围的限制,即满足:

$$P_{Gi,\min} < P_{Gi} + \Delta P_{Gi} < P_{Gi,\max} \quad (15)$$

其中, P_{Gi} 为发电机 i 当前的出力; $P_{Gi,\max}$ 、 $P_{Gi,\min}$ 分别为发电机 i 的最大出力和最小出力。

综上,若要上调等值机出力以降低平衡机出力,则节点 i 的最终功率调整量为:

$$\Delta P_{Gi} = \min \{ \Delta P_{Gi-k}, \Delta P_{Gi-\min}, \Delta P_{Gi-r}, P_{Gi,\max} - P_{Gi} \} \quad (16)$$

相反地,若要下调等值机出力增加平衡机出力,则最终调整量为:

$$\Delta P_{Gi} = \min \{ \Delta P_{Gi-k}, \Delta P_{Gi-\min}, \Delta P_{Gi-r}, P_{Gi} - P_{Gi,\min} \} \quad (17)$$

3 定向调整策略

等值后平衡机出力的变化决定了等值机出力调整的方向以及调整量的大小,按照上述原则选取控制节点,无需调整系统中所有的等值机组,只需定向地调整某些特定的机组。假设等值后平衡机出力增加,则调整策略如下。

a. 根据等值后系统各等值机的当前出力大小,确定所有可调机组集合作为控制节点集合 J_c ,为快速降低平衡机出力,需要上调控制节点的出力,调整目标为调节总量尽可能接近等值后平衡机出力的增加量。

b. 搜索出系统中潮流误差最大的线路 k ,计算出集合 J_c 中的所有控制节点对线路 k 的灵敏度,找出灵敏度绝对值最大且节点出力增加方向有利于减小线路 k 的潮流误差的节点 i 作为本次调整的控制节点。

c. 利用 2.3 节的方法计算节点 i 的功率调整量,并增加节点 i 的出力。

d. 判断调节总量是否满足要求,即 $|P'_{Gr} - P_{Gr}| < \varepsilon$,其中 ε 为给定的精度值,例如取 0.1 MW。若满足精度要求,则调整结束;否则更新潮流计算结果,将节点 i 从集合 J_c 中移除,转至步骤 **b** 进行下一次的调整。

等值机出力调整策略的流程图如附录中图 A1 所示。本文采用的是逐步调整的方法,在出力调整过程中,严格限制每次的调整量和线路功率的变化,调整后系统总的发电与负荷仍然是平衡的,调整的本质是将平衡机多余的不平衡功率反过来分担到其他等值机组上,使得调整后的系统不平衡功率与原系统保持一致,因此这种调整可以看作是不平衡功率分担的一个逆过程,在原系统潮流能够收敛的情况下,理论上出力调整后的系统也能够收敛。

4 仿真算例

本文以南方电网某年度方式数据为例,利用 PSD-BPA 软件对该系统进行了仿真计算。经动态等值后的系统共有 620 个节点,956 条支路,等值前平衡机 G_0 的出力为 35.62 MW,等值后出力为 54.42 MW,等值后出力增加了 18.8 MW。 $t=1$ s 时在系统中设置三相短路故障,对等值前后的系统分别进行潮流计算和稳定计算,等值前后都以同一台发电机作为功角参考机,且该参考机在等值前后功角一致。图 2 为平衡机等值前后的功角摇摆曲线,可以看出初始功角相差 3° 左右,导致等值后平衡机的功角摇摆曲线整体上移。其他保留机组在潮流计算中都作为 PV 节点或 PQ 节点,其出力在等值前后相等。图 3 为另一保留机组 G_1 (非平衡机组) 的功角摇摆曲线,可以看出在等值前后其功角基本一致,有功出力在等值前后没有发生变化。

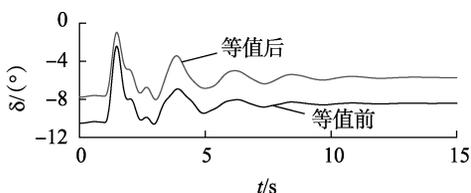


图 2 调整前平衡机功角摇摆曲线

Fig.2 Power angle swing curves of balancing machine before adjustment

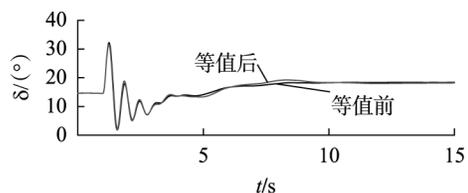


图 3 调整前发电机 G_1 功角摇摆曲线

Fig.3 Power angle swing curves of G_1 before adjustment

表 1 为根据本文方法得到的调整策略表,调整后平衡机 G_0 的出力变为 35.68 MW,相比于调整前出力减少了 18.74 MW,而从表 1 中可以看出机组出力的调整总量为 17.9 MW,并不等于平衡机出力的减少量,这是因为调整前后网损发生了改变,调整后

的网络损耗减少了 0.84 MW。表 2、3 分别列出了调整前后潮流偏差最大的 5 条支路及其偏差大小。表中, μ 为偏差百分比,满足式(18)。

$$\mu = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \times 100\% \quad (18)$$

其中, P_1 和 P_2 分别为等值前、后线路的功率。

表 1 调整策略

Table 1 Adjustment strategies

机组	原出力/MW	调整量/MW	最终出力/MW
005	1 500	1.8	1 501.8
014	4 600	0.9	4 600.9
036	668	0.6	668.6
058	4 560	7.1	4 567.1
103	170	4.2	174.2
105	256	3.3	259.3

表 2 调整前线路潮流信息

Table 2 Power flow information of lines before adjustment

支路	P_1 /MW	P_2 /MW	潮流偏差/ MW	偏差百分比 $\mu/\%$
231	237.4	246.9	9.5	4.00
272	440.9	449.1	8.2	1.86
061	841.7	834.8	-6.9	-0.82
769	447.0	452.9	5.9	1.32
508	2 699.2	2 704.2	5.0	0.19

表 3 调整后线路潮流信息

Table 3 Power flow information of lines after adjustment

支路	P_1 /MW	P_2 /MW	潮流偏差/ MW	偏差百分比 $\mu/\%$
231	237.4	246.2	8.8	3.71
272	440.9	448.8	7.9	1.79
061	841.7	834.8	-6.9	-0.82
637	357.4	351.5	-5.9	-1.65
513	587.4	592.2	4.8	0.82

图 4、5 分别为调整后的平衡机和发电机 G_1 的功角摇摆曲线。可以看出,平衡机的初始功角差问题基本被消除,而发电机 G_1 在调整过程中有功出力没有发生变化,由于发电机的功角摇摆特性主要与有功功率有关,且本文方法不涉及网络和发电机参数的调整,因此调整后的功角摇摆曲线(图 5)与调整前的功角摇摆曲线(图 3)相比基本不变,表明在调整过程中其他保留机组的功角摇摆特性基本不会受调整的影响。

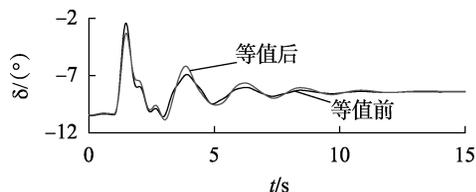
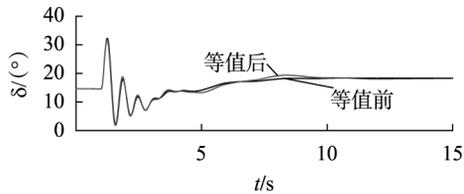


图 4 调整后平衡机功角摇摆曲线

Fig.4 Power angle swing curves of balancing machine after adjustment

图5 调整后发电机 G_1 功角摇摆曲线Fig.5 Power angle swing curves of G_1 after adjustment

5 结论

在对大电网进行动态等值的过程中,等值后系统平衡机出力可能发生改变,导致其初始功角产生偏移,平衡机作为保留机组应保证等值前后其转子摇摆曲线基本一致,需要对其进行调整。本文推导了发电机功角初始值的表达式,并据此分析了发电机出力变化对功角初始值的影响;基于功率灵敏度,提出了控制节点的选取原则、功率调整量的计算方法以及调整策略和策略的实现流程,在调整过程中考虑线路潮流的变化,保证等值前后相同线路潮流偏差控制在要求的范围内,能有效消除平衡机初始功角偏移的问题,且其他保留机组的功角摇摆特性不受调整的影响。针对南方电网某年度方式等值数据进行了仿真验证,表明了本文提出的调整策略是合理有效的。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 朱琳,葛俊,吴学光,等.一种工程实用的电力系统等值方法[J].电力自动化设备,2017,37(9):178-184.
ZHU Lin, GE Jun, WU Xueguang, et al. Power system equivalence for practical engineering[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9): 178-184.
- [2] 熊卿,席亮,周宝荣,等.基于PSCAD/EMTDC的大规模交直流电网实际故障再现[J].中国电力,2014,47(9):100-106.
XIONG Qing, XI Liang, ZHOU Baorong, et al. Simulating reappearing of an actual fault in large-scale AC/DC power system based on PSCAD/EMTDC[J]. Electric Power, 2014, 47(9): 100-106.
- [3] 张一获,管霖.交直流互联电网动态等值的实用化方法[J].电力自动化设备,2013,33(2):120-125.
ZHANG Yidi, GUAN Lin. Practical dynamic equivalence of AC-DC interconnected power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 120-125.
- [4] 倪以信,陈寿孙,张宝霖.动态电力系统的理论和分析[M].北京:清华大学出版社,2002:330-349.
- [5] 田芳,周孝信,于之虹.基于灵敏度分析和时域仿真的暂态稳定预防控制优化方法[J].电力自动化设备,2018,38(7):155-161.
TIAN Fang, ZHOU Xiaoxin, YU Zhihong. Optimization method of transient stability preventive control based on sensitivity analysis and time domain simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 155-161.
- [6] 邓佑满,黎辉,张伯明,等.电力系统有功安全校正策略的反向等量配对调整法[J].电力系统自动化,1999,23(18):5-8.
DENG Youman, LI Hui, ZHANG Boming, et al. Adjustment of equal and opposite quantities in pairs for strategy of active power security correction of power systems[J]. Automation of Electric Power Sys-

tems, 1999, 23(18): 5-8.

- [7] 程临燕,张保会,郝治国,等.基于综合灵敏度分析的快速控制算法研究[J].电力自动化设备,2009,29(4):46-49.
CHENG Linyan, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, et al. Fast control algorithm based on integrative sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(4): 46-49.
- [8] 任建文,魏俊姣,谷雨峰.基于多目标粒子群优化算法的连锁跳闸预防控制[J].电力自动化设备,2016,36(7):53-59.
REN Jianwen, WEI Junjiao, GU Yufeng. Preventive control based on multi-objective particle swarm optimization algorithm for cascading trips[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 53-59.
- [9] 徐岩,邹静.基于功率灵敏度和机组再调度的割集断面潮流定向控制[J].电网技术,2015,39(8):2258-2263.
XU Yan, ZHI Jing. Directional control of the cut set interface power based on power sensitivity and generator re-dispatch[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2258-2263.
- [10] 徐慧明,毕天姝,黄少锋,等.基于广域同步测量系统的预防连锁跳闸控制策略[J].中国电机工程学报,2007,27(19):32-38.
XU Huiming, BI Tianshu, HUANG Shaofeng, et al. Study on wide area measurement system based control strategy to prevent cascading trips[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 32-38.
- [11] 熊宁,程浩忠,马则良,等.基于负荷裕度最大化的发电出力优化(一)优化模型的提出[J].电力系统自动化,2009,33(19):42-45.
XIONG Ning, CHENG Haozhong, MA Zeliang, et al. Generation dispatch optimization for maximizing loading margin part one presentation of the optimization model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19): 42-45.
- [12] 戴博,张建华,刘军.考虑动态电压安全的发电机有功出力最优调整[J].电网技术,2009,33(3):44-48.
DAI Bo, ZHANG Jianhua, LIU Jun. Active power output rescheduling with dynamic voltage stability margin considered[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 44-48.
- [13] 胡泽春,周前,程浩忠.考虑发电机出力调整的最近电压稳定临界点求取方法[J].中国电机工程学报,2010,30(25):37-43.
HU Zechun, ZHOU Qian, CHENG Haozhong. Method of calculating closest critical point of voltage stability considering generation output adjustment[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 37-43.
- [14] 崔丽华,陈根军.多平衡机潮流计算在调度员潮流中的应用[J].广东电力,2009,19(9):13-17.
CUI Lihua, CHEN Genjun. Application of multi-slack load flow calculation in dispatcher power flow[J]. Guangdong Electric Power, 2009, 19(9): 13-17.
- [15] 杜正春,王延延,王毅,等.获取电力系统运行方式的多平衡机潮流模型[J].电力系统自动化,2014,38(16):41-46.
DU Zhengchun, WANG Yanyan, WANG Yi, et al. Multi-balancing machine load models for obtaining power system operation mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 41-46.

作者简介:



夏成军

夏成军(1974—),男,湖北黄冈人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制、电力系统仿真技术、FACTS & HVDC (E-mail: cjxia@scut.edu.cn);

华夏(1992—),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制 (E-mail: xhua0768@163.com);

李清(1989—),男,湖北荆州人,工程师,博士,主要研究方向为电力系统分析、运行与控制。

(下转第134页 continued on page 134)

Society, 2016, 31(9): 16-24.

- [13] 杨文博, 宋强, 朱喆, 等. 基于直流内电势控制的 MMC 多端直流输电系统最优下垂控制[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 51-59.
- YANG Wenbo, SONG Qiang, ZHU Zhe, et al. Optimal droop control based on direct DC internal potential control for MMC-MTDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 51-59.
- [14] 李文勋, 车延博, 洪潮, 等. 考虑输电损耗和新能源波动的 VSC-MTDC 下垂控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 220-226.
- LI Wenxun, CHE Yanbo, HONG Chao, et al. VSC-MTDC droop control strategy considering transmission loss and renewable energy fluctuation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 220-226.
- [15] VRANA T K, BEERTEN J, BELMANS R, et al. A classification of

DC node voltage control methods for HVDC grids[J]. Electric power systems research, 2013, 103: 137-144.

作者简介:



翟冬玲

翟冬玲(1989—),女,黑龙江佳木斯人,博士研究生,主要研究方向为高压直流输电及系统稳定性(E-mail: zhaidongling@ncepu.edu.cn);

韩民晓(1963—),男,陕西西安人,教授,博士,主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用等(E-mail: hanminxiao@263.net);

net);

马骏鹏(1993—),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要研究方向为高压直流输电(E-mail: majunpeng9311@163.com)。

Adaptive droop control of VSC-MTDC connected to low inertia system

ZHAI Dongling¹, HAN Minxiao¹, MA Junpeng¹, WANG Peng²

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. New Energies Sources Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China)

Abstract: As for the VSC-MTDC (Voltage Source Converter based Multi-Terminal Direct Current) system connected to low inertia AC system, the frequency of the system may fluctuate when large disturbances happen. Therefore, the P - f droop control is introduced in the converter control to supply virtual inertia for AC system. In order to further suppress the frequency fluctuation, an adaptive droop control for VSC-MTDC is designed. This control method can take advantages of converter capacity to a large extent, adjust active power quickly and reduce DC voltage variation. Additionally, a three-terminal model is built in the PSCAD/EMTDC software to compare and analyze the impacts on frequency and DC voltage of master-slave control, P - f droop control and adaptive droop control. The simulative results show that the droop control based on P - f curve can suppress the frequency fluctuation effectively and the adaptive droop control can reinforce the suppression effect and decrease the voltage variation so as to improve the power system stability.

Key words: low inertia system; VSC-MTDC power transmission; adaptive droop control; stability

(上接第 127 页 continued from page 127)

Directional adjustment strategy for equivalent generator output based on power sensitivity

XIA Chengjun¹, HUA Xia¹, LI Qing²

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Maintenance & Test Center, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510663, China)

Abstract: The initial power angle is not consistent before and after equivalence due to the variation of balancing machine output. To address this problem, the reason for the variation of balancing machine output and the mechanism of power angle deviation are analyzed. A directional adjustment strategy of equivalent generator output based on power sensitivity is presented. Based on the power flow control constraints for transmission lines and the ramping constraints for generators, the power adjustment of the control node is determined. According to the magnitude of the sensitivity and the line power flow deviation, the selection approach for control nodes is proposed. The line power flow deviation before and after the equivalent is controlled within the required range considering the determination of control nodes and the adjustment quantity. The power angle deviation of the balancing machine can be eliminated using directional adjustment of equivalent generator output. The corresponding adjustment steps and strategy process are also discussed. The effectiveness of the adjustment strategy is verified by the case of the annual data of China Southern Power Grid.

Key words: dynamic equivalence; initial power angle deviation; power sensitivity; adjustment strategy; electric power systems

附录

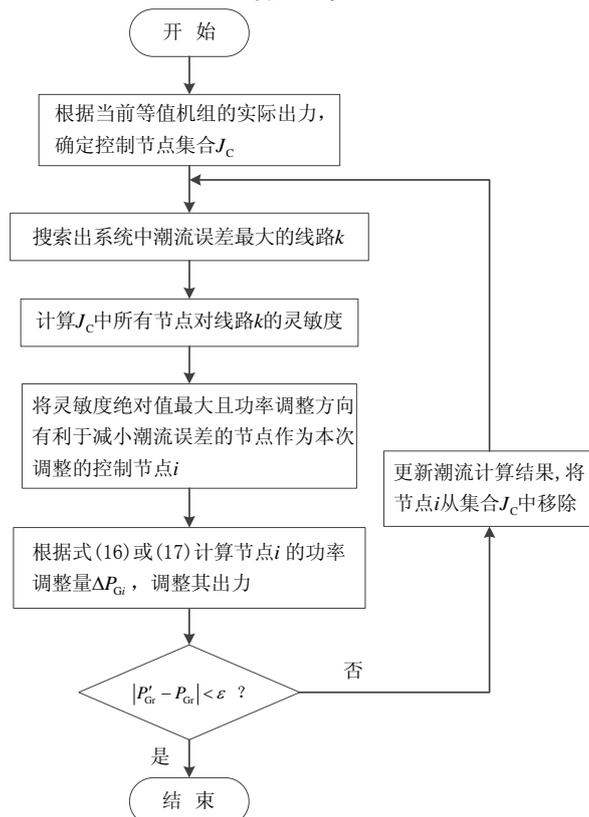


图 A1 等值机出力调整流程图

Fig.A1 Flowchart of adjustment strategy of equivalent generator output