

“9·19”锦苏直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析及思考

李兆伟^{1,2}, 吴雪莲^{1,2}, 庄侃沁³, 王亮³, 缪源诚³, 李碧君^{1,2}

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏省南京市 211106; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏省南京市 211106;

3. 国家电网公司华东分部, 上海市 200120)

摘要: 小负荷方式下系统的频率稳定形势日趋严峻。针对华东电网“9·19”事故,从负荷模型及调速器/原动机模型角度研究分析了影响华东电网频率响应特性的关键因素。基于实测数据,对华东电网负荷频率响应因子,机组的一次调频限幅、调差系数,以及锅炉主蒸汽压力模型相关参数进行了辨识,复现“9·19”事故的频率响应特性。根据辨识结果反映的问题提出了相关建议。

关键词: 频率; 调速器; 主蒸汽压力; 参数辨识

0 引言

2015年9月19日21:58:02,锦苏特高压直流发生双极闭锁,故障前,落地华东电网的直流输电功率总量约为25.7 GW,其中锦苏直流落地功率约为4.9 GW,系统频率为49.97 Hz,华东电网负荷为138 GW,开机168 GW,旋转备用约为52 GW。故障发生后,华东电网出现较大功率缺额,12 s后全网频率最低跌至49.56 Hz,经电网动态区域控制偏差(ACE)动作以及华东网调的紧急调度,约240 s后频率恢复至50 Hz。

计算表明,本次事故中华东电网损失发电约3.55%,即造成了约0.41 Hz的频率跌落,系统频率稳定特性弱于之前的经验认识^[1-3],主要与小负荷方式下电网开机规模较小导致系统转动惯量降低有关,且机组的一次调频情况不及预计情况。而经时域仿真分析,现调度采用的仿真模型参数不能完全复现事故后频率特性。按照“十三五”规划,未来两年内华东电网还将建设投运晋北—南京、锡盟—泰州、准东—皖南三回特高压直流,电网面临大容量功率缺额风险加大,如此巨量的直流接入背景下准确把握华东电网的频率稳定特性刻不容缓,需要深入分析影响系统频率仿真特性的关键因素,基于实测故障录波数据提出满足系统频率仿真要求的模型参数,提高电网频率仿真精度。

文献[4]通过数字仿真从静态负荷频率调节系

数、感应电动机比例、发电机模型、调速器一次调频限幅等角度,分析了华东电网频率仿真结果与实际系统频率响应差异的原因,为本文的研究提供了基础,但考虑的因素有所欠缺,未给出适应电网频率仿真要求的参数建议。文献[5]通过对影响频率响应轨迹的主要参数进行了灵敏度分析,基于此依据来调整参数使动态频率仿真轨迹与实测频率轨迹尽可能接近,但对拟合结果缺少有效的量化评估手段。文献[6]采用遗传算法实现了同步发电机参数的辨识,遗传算法搜索空间大,虽然具有良好的全局收敛性能,但搜索速度较慢,而且稳定性较差,搜索方向具有随机性,每次搜索得到的结果可能会有差异^[7]。

本文针对“9·19”锦苏直流双极闭锁事故,通过仿真分析,模拟华东电网频率响应特性,梳理影响华东电网频率响应特性的关键因素,根据系统中各参数对频率特性的影响趋势,基于实测故障录波数据对影响华东电网频率响应特性的关键模型参数进行辨识,使系统频率仿真轨迹与实测频率轨迹基本吻合,提高电网频率仿真精度。根据曲线拟合结果反映的问题,对华东电网大容量直流接入背景下的频率控制提出建议。

1 影响频率响应的主要因素

电力系统频率反映了系统中有功功率的平衡情况。当电力系统发生大容量功率缺额时,各机组将释放储存的部分惯性动能,动能的消耗将使机组转速下降,从而使系统频率降低^[8]。当电力系统频率偏离额定值时,负荷吸收的有功功率随之变化。可以认为对于一个确定的网络输电结构,系统在遭受大功率缺额冲击后,决定系统暂态频率响应特性的

收稿日期: 2016-09-10; 修回日期: 2016-12-11。

上网日期: 2017-02-14。

国家电网公司科技项目“改善系统频率稳定性的跨区多直流功率紧急支援协控系统关键技术研究”。

因素主要包括系统负荷特性、一次调频性能和锅炉蓄能特性等。下面将分别进行具体的分析。

1.1 一次调频性能

一次调频是指当电力系统频率偏离目标频率时,发电机组通过调速系统的自动反应,调整有功出力以维持电力系统频率稳定。一次调频性能的优劣对系统的频率响应特性影响重大。一般来说,配置了调速系统的发电机都具备一次调频能力^[9],从广义角度讲,开放了频率调制功能的直流也具备一次调频能力。一次调频性能对电网频率影响的研究已较为成熟,本文结合华东电网,分析了火电机组对电网频率的影响,详细分析过程见附录 A。一次调频限幅和调差系数都是影响电网频率响应特性的关键因素,二者同时影响着大容量不平衡功率冲击下系统频率的最大偏差及恢复水平。随着一次调频限幅的增加,系统一次调频容量增加,系统频率调节能力增强;随着调差系数增加,一次调频性能变差,系统频率调节能力减弱。

1.2 负荷模型

负荷模型也是影响系统频率响应特性的重要因素^[10]。目前电力系统仿真中,负荷模型主要采用静态负荷模型和动态负荷模型两大类。

常用的静态负荷模型如式(1)所示。

$$\begin{cases} P = P_0 \left[P_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + P_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + P_3 \right] (1 + \Delta f L_{DP}) \\ Q = Q_0 \left[Q_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + Q_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + Q_3 \right] (1 + \Delta f L_{DQ}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: P 和 Q 分别为负荷的有功分量和无功分量; P_0 和 Q_0 分别为负荷在额定电压和额定频率时所消耗的有功和无功功率; P_1, P_2, P_3 分别为恒阻抗负荷、恒电流负荷、恒功率负荷中有功分量占比,满足 $P_1 + P_2 + P_3 = 1$; Q_1, Q_2, Q_3 分别为恒阻抗负荷、恒电流负荷、恒功率负荷中无功分量占比,满足 $Q_1 + Q_2 + Q_3 = 1$; V 为系统电压; V_0 为额定电压; Δf 为系统频率相对额定频率的偏差; L_{DP} 和 L_{DQ} 分别为有功负荷和无功负荷的频率响应因子。系统负荷的各类型占比、有功频率响应因子均对系统频率响应有较大影响。

动态负荷模型主要考虑感应电动机模型,一般认为感应电动机模型主要与系统的电压稳定特性密切相关,实际上一方面电动机转子运动方程中包含频率的一次导数项,另一方面电动机负荷的电压特性会通过影响负荷的有功分量来影响系统的频率特性。本文分析了静态负荷模型和动态负荷模型对系统频率响应特性的影响,详见附录 A。静态负荷的

有功负荷频率响应因子和动态负荷的感应电动机比例都对系统频率最大偏差影响较大。随着有功负荷频率因子的增加,系统频率稳定特性有所提高,频率偏差有减小的趋势。基于所采用的感应电动机模型及仿真边界条件,随着感应电动机比例的增加,系统频率响应特性略有恶化的趋势,系统最大频率偏差变大。

1.3 锅炉主蒸汽压力

在目前的频率仿真中,一般假定机组蓄热能力足够大,即锅炉主蒸汽压力恒定不变,原动机出力仅与气门开度成正比。但是实际上,机组蓄热能力总是有一定限度的,当机组蓄热逐渐耗尽或主蒸汽压力因气门开度的变化而变化时,原动机输出功率便会受到影响,机组的一次调频性能也会受到影响,进而会影响系统的频率响应特性。

在系统大功率缺额时,锅炉的蓄热能力不足以长时间维持主蒸汽压力恒定,从而使得调速器的调门指令与主蒸汽压力存在一定比例关系。随着主蒸汽压力的降低,调门指令将呈下降趋势,即机组的一次调频能力有逐渐下降的趋势。附录 A 详细仿真分析了锅炉主蒸汽压力模型对华东电网频率的影响。

考虑锅炉模型后系统最低频率和稳态频率均有较大程度的降低,尤其对稳态恢复频率,由于锅炉蓄热的逐渐减小,受影响更大。历次事故分析表明,特别是在系统大功率缺额下,锅炉蓄热能力的影响更加明显,是影响系统恢复频率的重要因素。

1.4 其他因素

由于电力系统频率反映了系统中有功功率的平衡情况,系统中所有对故障后发电出力和负荷响应造成影响的因素都会影响系统频率响应。通过对“9·19”事故中相量测量单元(PMU)录波电压曲线分析发现,本次事故中锦苏直流闭锁后切滤波器组的时间间隔较长,时间间隔在15s左右,导致直流闭锁后一段时间内电压持续高于故障前水平,从负荷的电压特性可知,系统中的等效负荷有所增加,会恶化故障后频率稳定特性。分别考虑锦苏直流故障后间隔15s切一组滤波器、间隔0.3s切一组滤波器、不切除滤波器,则滤波器不同切除策略下的系统频率响应对比如图1所示。

由仿真曲线可以看出,切除滤波器策略对系统直流故障后的频率响应特性影响较大,间隔0.3s切除一组滤波器的频率最低值比间隔15s情况下高了将近0.1Hz。这是由于直流换流站滤波器组提供的无功功率一般都较大,不同的切除策略对近区母线电压影响较大。以苏州换流站近区的木渎站母

线电压为例,在两种滤波器切除方式下的电压标幺值分别为 0.96 和 1.01,若就地负荷均为恒阻抗负荷,折算出故障期间,0.3 s 间隔情况下的负荷仅占 15 s 间隔下负荷的 90%。特高压直流落点地区一般是电网的负荷中心,负荷占比大,因此,不同的滤波器切除方式通过对系统负荷的影响,将会对系统频率响应产生较大的影响。

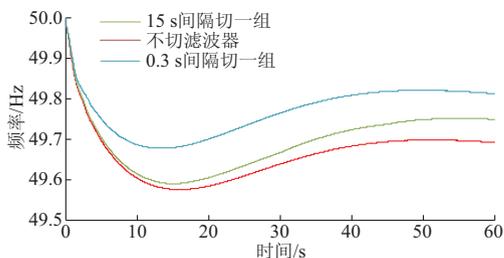


图1 滤波器切除方式与频率仿真轨迹关系
Fig.1 Relationship between resection of filter and dynamic frequency simulation trajectory

通过仿真分析发现:机组的一次调频能力是影响直流闭锁等大功率扰动后系统频率最大偏差的主要因素;负荷模型对频率响应也有较大的影响,静态负荷的负荷频率因子是主要因素,在直流闭锁故障下动态负荷的感应电动机比例的影响相对较小;大功率缺额扰动客观上需要机组在故障期间持续供给出力保证系统功率平衡,锅炉蓄热能力是影响一次调频持续作用的重要因素,不能忽视;直流闭锁后的切滤波器策略对近区负荷中心的负荷电压响应特性影响较大,进而会影响系统频率特性,建议在频率仿真中采用实际切除滤波器策略。

2 华东电网频率仿真参数辨识

通过仿真可知,基于目前华东电网仿真采用的调速器、负荷模型参数,仿真的频率响应与系统频率实测曲线有较大差异,因此需要基于实测曲线,开展调速器、负荷模型参数辨识。仿真模型参数辨识是一项工程浩大的工作,要完全复现故障特性,需要辨识的参数维度非常大。对目前的华东电网来说,大容量直流接入后系统频率特性是电网关注的首要问题,为提高辨识效率,本文仅对系统频率特性影响密切的调速器、负荷参数开展辨识,以提高当前形势下华东电网频率仿真的精度。理论上讲,可以将调速器和负荷参数作为待辨识参数同时辨识,但为提高辨识结果的物理意义及工程应用价值,本文对调速器和负荷参数解耦辨识。

2.1 华东电网负荷频率响应因子辨识

由于本文重点关注频率特性,电网的负荷建模本身就是一项非常复杂的技术难题,需要开展大量

的实测、调研及统计工作,不是本文的研究重点,本文在开展负荷参数辨识时基于华东电网目前使用的负荷模型(即保持华东电网使用静态负荷模型,且静态负荷模型中各成分的比例也保持不变),为模拟华东电网频率特性,重点对负荷的频率响应因子进行辨识。

辨识负荷频率影响因子的基本原理是利用电网在频率变化 Δf 时负荷相应的变化量 ΔP ,从而利用 $\Delta P/\Delta f$ 计算,但这样操作忽略了系统扰动过程中电压变化的影响,会影响频率响应因子的精确性。假设某负荷节点初始电压为 V_{ini} 、系统频率与基准频率偏差为 Δf_{ini} (考虑正常运行情况下系统频率基本维持在 50 Hz 附近, $\Delta f_{ini} = 0$)、负荷功率为 P_{ini} 。系统发生大功率缺额后,频率最低时偏差为 Δf_t ,频率最低点时刻该负荷节点电压为 V_t ,负荷功率为 P_t ,对华东电网有 $P_2 = 0$,则由式(1)可得负荷的变化量为:

$$\Delta P = P_{ini} - P_t = P_0 P_1 \left(\frac{V_{ini}^2 - V_t^2}{V_0} \right) + P_0 \left[P_1 \left(\frac{V_t}{V_0} \right)^2 + P_3 \right] \Delta f L_{DP} \quad (2)$$

进一步化解可得:

$$L_{DP} = \frac{\Delta P + P_0 P_1 \left(\frac{V_t^2 - V_{ini}^2}{V_0} \right)}{P_0 \left[P_1 \left(\frac{V_t}{V_0} \right)^2 + P_3 \right] \Delta f} \quad (3)$$

按照上述推导过程理论上可以计算每个负荷节点的频率响应因子,但考虑到负荷模型的不确定性过多,且实测条件不具备,无法针对每个负荷节点均辨识其频率响应因子,由于主要研究华东全网的频率响应特性,本文重点针对华东全网的综合频率响应因子,由式(4)可得综合频率响应因子 \bar{L}_{DP} (忽略系统中频率分布特性)。

$$\bar{L}_{DP} = \frac{\Delta P_{sys} + \sum_{j=1}^N P_{jini} P_1 \left(\frac{V_{jt}^2 - V_{jini}^2}{V_0} \right)}{\sum_{j=1}^N P_{jini} \left[P_1 \left(\frac{V_{jt}}{V_0} \right)^2 + P_3 \right] \Delta f_t} \quad (4)$$

式中: ΔP_{sys} 为系统频率最低点处全网负荷相对故障前负荷的变化量; N 为实际电网中监测的变电站总数; j 为监测的变电站编号; P_{jini} , V_{jini} , V_{jt} 分别为变电站 j 的初始负荷、初始电压和频率最低点的电压。

式(4)具体计算时按如下步骤开展:①统计故障前时刻各监测变电站母线电压;②统计计算扰动发生后频率最低值时刻的华东全网机组的一次调频出力增加值之和;③统计计算扰动发生后频率最低值时刻各监测变电站母线电压;④将扰动损失功率减

去步骤②的计算结果,得出全网负荷变化值 ΔP_{sys} ;
⑤根据式(4)计算华东电网的综合频率响应因子。

2.2 华东电网调速器参数辨识

由于目前华东电网频率仿真采用的是典型调速器模型参数而不是实测模型参数,因此针对单台机组的调速器逐一进行参数辨识尚不具备条件。本文在进行调速器模型参数辨识时不针对单台机组开展,而是对同一种模型的调速器使用相同的参数,在提高工作效率的同时可以保证华东全网的频率特性与实际故障响应相符。另外,对于直流闭锁事故导致的功率大规模缺额扰动,华东电网的系统功角稳定裕度较大且同调性较好,频率的分布特性基本可以忽略,具体证明见附录 A。

根据 2.1 节分析,影响系统频率特性的调速器关键参数较多,即需要辨识的参数空间维度较高。单纯形(simplex)优化算法由 Nelder 和 Mead 提出,是一种求取高维数复杂优化问题的直接搜索方法^[11]。在 n 维空间里,单纯形是指 $n+1$ 个顶点通过线段相连构成的最简单图形,对于本文需要辨识的调速器众多参数,利用单纯形算法能够指导最佳的寻优方向,从而能够避免大量无意义的迭代计算,具体步骤如下。

步骤 1:在 BPA 中建立详细的华东电网模型,定义系统待辨识的 n 维参数空间 $[x_1, x_2, \dots, x_n]$,设置参数空间的取值范围,即考虑实际系统对于参数的约束条件,本文考虑辨识的调速器参数包括一次调频限幅、调差系数及锅炉主蒸汽压力模型中的管道流量系数、汽包蓄热系数和管道蓄热系数。

步骤 2:根据研究需求,构造系统优化的目标函数 J 。系统仿真可信度分析的核心问题是误差指标的确定,其标准值是定量分析仿真结果与实测结果之间的误差。则参数优化的目标就是寻找使得目标函数最小的参数,目标函数可定义为:

$$J = \sum_{i=1}^n (y_i - a_i)^2 \quad (5)$$

式中: n 为采样点数,其中录波频率曲线的采样时间为 0.04 s; y_i 为仿真结果曲线 Y 的第 i 个点数值; a_i 为实测结果曲线的第 i 个点数值。目标值越小,说明建立的模型参数仿真结果与实测曲线的拟合误差越小,模型精度也就越高。

步骤 3:对于参数空间的一组参数值 $[x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0}]$,通过 BPA 仿真计算得到输出变量值 Y_0 ,将其代入目标函数,计算误差值。

步骤 4:利用单纯形算法按照一定的规则在 n 维参数空间产生 $n+1$ 个参数集合,并且按照步骤 3 计算出 $n+1$ 个目标函数值,计算最大值和最小值

的差值,若满足一定的收敛判据,则说明参数已经找到,停止参数优化;若不满足判据,则利用单纯形算法程序智能地生成新一组参数替换目标函数值最大的一组参数,与其他参数组构成新的输入参数集,并重复步骤 3 和 4,直到目标函数满足判据为止。其中,基于单纯形算法的新参数组的具体生成方法如下。

首先,将最大目标函数值对应的参数组反射^[12],得到反射参数组,并计算该反射参数组对应的目标函数值。①若该目标函数值小于次大目标函数值,则基于最大目标函数对应的参数组和反射数组生成扩张参数组,若扩张参数组对应的目标值小于反射数组目标值,则扩张数组作为替换数组;否则,反射数组作为替换数组。②若反射数组目标函数值大于最大目标函数值,则基于最大目标函数对应的参数组和反射数组生成压缩参数组。③若反射数组目标函数值介于最大和次大目标函数值之间,则先将最大目标函数对应的参数组和反射数组互换,再生成压缩参数组。④生成压缩数组的情况下,若压缩参数组的目标函数小于次大目标函数值,则压缩数组作为替换数组;否则,直接用目标函数值最小的参数组与每个参数组自身的中点值来替换原参数组。

2.3 华东电网“9·19”事故频率特性复现

目前华东电网仿真计算主要采用静态负荷模型,上海、江苏、浙江、安徽采用 40% 恒阻抗 + 60% 恒功率,有功频率响应因子为 2.1,福建采用 60% 恒阻抗 + 40% 的恒功率,有功频率响应因子为 1.8,无功频率响应因子全网统一采用 -2.5。调速器模型方面,各省调差率为 4%~6%,一次调频限幅为 5.4%~7.3%,锅炉的主蒸汽压力模型均不考虑。

由于华东电网 PMU 布点有限,主要覆盖华东 500 kV 电压等级及以上变电站、220 kV 及以上发电厂,对 220 kV 及以下等级负荷节点的监测较少,准确统计计算由电压变化导致的负荷变化存在困难,仿真复现时按照 2.1 节所提出的步骤利用华东 500 kV 厂站的电压变化,近似计算电压变化所造成的负荷变化,进而粗略得到由频率变化导致的负荷变化,求出华东全网的频率负荷因子。根据统计计算,华东电网负荷模型中的频率仿真因子大致在 1.9~2.48,华东现有负荷模型基本可以满足频率仿真需求,且略有保守。考虑到负荷模型影响因素较广,从工程应用实际的角度,在未开展详细的负荷模型专项研究确定新的负荷模型参数前,维持现有模型参数不变。由于目前还不具备针对每台机组的调速参数进行实测,因此,辨识的仿真模型参数采用全

网统一,需要辨识的参数包括调差系数、一次调频限幅、管道流量系数、汽包蓄热系数以及管道蓄热系数。首先基于单纯形算法在“9·19”事故中部分大机组的实测参数中选择5组参数作为初始参数集合,再利用BPA仿真程序,计算出对应的5组目标函数值,利用单纯形算法,确定寻优方向,迭代产生新的参数集合,直至满足收敛判据。辨识后的一次调频调差系数为8.5%,调频限幅为3.1%;主蒸汽压力模型的管道流量系数为3.0,汽包蓄热系数为350,管道蓄热系数为10。

仿真曲线与实测曲线及典型参数的仿真结果对比如图2所示,参数辨识后的仿真曲线与实测曲线的误差值仅为0.033。其中,实际的PMU录波曲线毛刺较大(见附录A),为便于计算拟合误差,已经作了预处理。

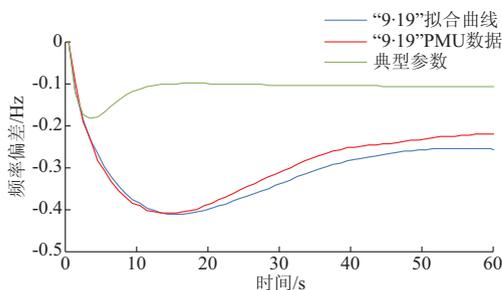


图2 “9·19”事件中仿真曲线与实测曲线的对比
Fig.2 Comparison between simulative curve and actual curve in “9·19” incident

通过对比曲线可见,参数辨识前仿真结果与实测响应曲线有较大差异,通过参数辨识给出的仿真模型参数能较好地同时拟合系统最低频率和恢复频率,且相对于实测曲线,仿真结果略有保守。此外,根据《电网运行准则》(GB/T 31464—2015)规定,火电机组一次调频限幅应不小于机组额定容量的6%,转差率应在4%~5%之间,由参数辨识结果可以看出,机组的平均一次调频性能达不到国标的要求。经统计,“9·19”事件中,挂网运行的282台大机组中,一次调频评价合格的仅86台,合格率仅为30.5%,这也是“9·19”事故中系统频率跌落幅值高于经验值的重要原因。

2.4 华东电网频率特性校核

基于上述拟合的参数来仿真复现华东电网“10·20”事故(2015年10月20日,宾金直流单极闭锁,损失功率3700 MW,频率最低跌落0.24 Hz),仿真结果与实测PMU数据对比如图3所示。可见,所辨识的参数模型能较好地复现“10·20”事故中的系统最低频率和恢复频率,参数有较好的适应性。

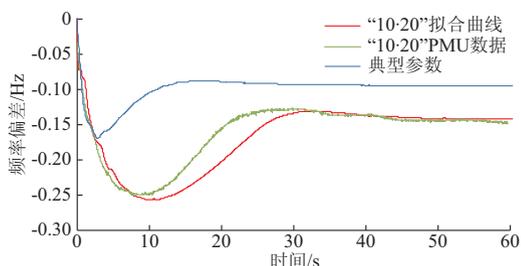


图3 “10·20”事件中仿真曲线与实测曲线的对比
Fig.3 Comparison between simulative curve and actual curve in “10·20” incident

以2016年秋季汛期典型方式为例,考虑负荷低谷121 GW、开机110 GW、旋转备用18.5 GW、直流大功率送电33.5 GW,发生宾金直流双极闭锁故障后,采用原始参数和辨识后的参数仿真的频率响应曲线如图4所示。可见,原始参数下的频率响应结果远远乐观于辨识后的参数结果,若采用原始的参数将无法预见实际运行中可能会导致低频减载动作的风险,建议华东电网负荷模型和调速器模型实测专项研究完成前的过渡阶段,采用拟合的仿真模型参数开展频率特性研究。

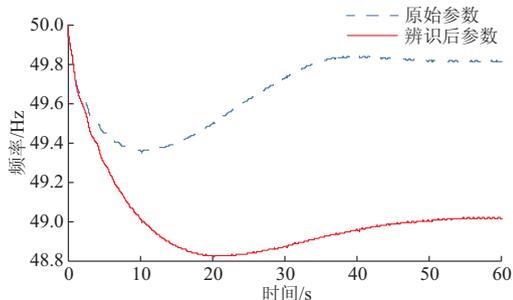


图4 2016年典型方式下原始参数和辨识后参数下的仿真曲线对比
Fig.4 Comparison between initial parameters and identified parameters under typical mode in 2016

3 结论

“9·19”事故发生以来,华东电网的频率特性引起广泛关注。通过仿真分析,电网小负荷运行方式下,大量直流馈入功率替代常规机组,导致系统转动惯量减小,一次调频能力减弱是造成频率稳定特性弱化的主要原因。本文通过对影响华东电网频率响应特性关键因素的分析研究,基于华东电网频率仿真模型现状,通过收集故障录波曲线,对华东电网负荷频率响应因子,机组的一次调频限幅、调差系数,以及锅炉主蒸汽压力模型相关参数进行辨识,成功复现“9·19”事故的频率响应特性,支撑了华东电网频率仿真分析,有如下结论与建议。

1) 锅炉主蒸汽压力模型对系统的频率响应有较大影响,尤其是电网出现大功率缺额后,锅炉蓄热能力有限,往往影响发电机一次调频能力的发挥,会恶化系统频率稳定特性,在以往的频率仿真分析中鲜有考虑,建议后续仿真分析中予以加强。

2) 机组一次调频性能对电网大功率扰动后频率下降的幅值以及恢复过程影响很大。机组实测功率曲线及仿真拟合都表明,“9·19”事故中的频率响应特性与机组一次调频达不到电网运行要求有很大关系,建议一方面加强发电机调速器/原动机涉网模型参数实测,在频率仿真分析中逐步采用实测调速器模型参数;另一方面加强并网机组一次调频能力监管,完善机组一次调频性能考核机制,特别是大频差扰动下的机组一次调频性能,积极探索有效管理手段,保证入网机组的一次调频性能。

3) 负荷模型参数是影响系统频率响应特性的重要因素,但严格来说,负荷的电压特性及频率特性都会对系统的频率响应造成重大影响,本文基于华东电网目前采用的负荷模型,利用“9·19”事故实测数据统计分析了事故时段华东全网负荷的综合频率响应因子约为1.9~2.48,当前的负荷模型基本可以满足电网频率仿真分析的需求,但考虑到随着电网的发展,未来华东电网的电压稳定特性也将有较大变化,进而对系统的频率响应也会造成较大影响,建议下一阶段从静态和动态负荷模型的比例、参数等方面开展华东电网负荷模型深化研究,提高电网仿真模型的精确度。

4) 基于实测曲线拟合电网仿真模型参数是一个复杂的多解问题,本文基于华东电网负荷模型参数保持不变的前提下,通过辨识调速器参数,较好地拟合了华东电网“9·19”和“10·20”事件中系统频率响应。在负荷建模和调速器建模专项研究完成之前,基于PMU实测录波曲线拟合的模型参数可作为华东电网频率仿真分析的过渡措施,但仍需结合电网的功率扰动事件滚动校核更新。

5) 随着馈入华东电网的直流输电容量越来越大,电网面临大容量功率缺失的风险不断增加,系统频率安全稳定形势日趋严峻,亟须加强电网三道防线建设。一方面,通过预防控制,合理安排电网运行方式,尤其是电网小负荷方式下,建议统筹优化安排多回特高压直流输送功率水平;另一方面,提高电网紧急控制水平,充分发挥电网各种可控资源,在保障电网安全稳定的前提下减小电网负荷损失风险。另外,提升电网第三道防线适应性,优化低频减载各轮次动作定值及切负荷比例,满足电网各种可能运行方式的控制要求,保障华东电网安全稳定运行。

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

参考文献

- [1] 陈平,李庆民,张黎.电网瞬时频率的一种跟踪算法[J].电力系统自动化,2007,31(1):80-84.
CHEN Ping, LI Qingmin, ZHANG Li. An algorithm for tracking instantaneous frequency of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 80-84.
- [2] 武诚,徐政,倪秋龙,等.基于响应特性的原动机及调速器建模与参数辨识[J].电工技术学报,2012,27(6):226-231.
WU Cheng, XU Zheng, NI Qiulong, et al. Modeling and parameter identification of turbine-governor based on response characteristics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 226-231.
- [3] KOSTEREV D. Hydro turbine-governor model validation in Pacific Northwest[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(2): 1144-1149.
- [4] 庄侃沁,武寒,黄志龙,等.龙政直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析[J].电力系统自动化,2006,30(22):101-104.
ZHANG Kanqin, WU Han, HUANG Zhilong, et al. Frequency analysis of East China grid after bipolar locking of Longzheng DC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(22): 101-104.
- [5] 刘洪波,穆钢,徐兴伟,等.使功-频过程仿真轨迹逼近实测轨迹的模型参数调整[J].电网技术,2006,30(18):20-24.
LIU Hongbo, MU Gang, XU Xingwei, et al. Model parameter regulation to make simulated trajectory of power-frequency process draw near measured trajectory based on trajectory sensitivity [J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 20-24.
- [6] 伍双喜,张伯明,吴文传,等.基于实测系统扰动的同步发电机参数辨识与验证[J].电网技术,2012,36(11):87-93.
WU Shuangxi, ZHANG Boming, WU Wenchuan, et al. Identification and validation for synchronous generator parameters based on recorded on-line disturbance data [J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 87-93.
- [7] 戴义平,邓仁纲,刘炯,等.基于遗传算法的汽轮机数字液调节系统的参数辨识研究[J].中国电机工程学报,2002,22(7):101-104.
DAI Yiping, DENG Rengang, LIU Jiong, et al. Study on parameter identification for steam turbine DHE governing system based on genetic algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 101-104.
- [8] 王波,张保会,郝治国.基于功率监测和频率变化率的孤岛微电网紧急切负荷控制[J].电力系统自动化,2015,39(8):33-37. DOI:10.7500/AEPS20140217002.
WANG Bo, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo. Emergency load shedding control for islanded microgrid based on power monitoring and rate of frequency change [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 33-37. DOI: 10.7500/AEPS20140217002.
- [9] 徐箭,施徽,徐琪.含风电的电力系统动态频率响应快速评估方法[J].电力系统自动化,2015,39(10):22-27. DOI:10.7500/AEPS20141012003.

XU Jian, SHI Wei, XU Qi. A fast assessment method for power system dynamic frequency response to wind power fluctuation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 22-27. DOI: 10.7500/AEPS20141012003.

[10] 岑炳成, 黄涌, 廖清芬, 等. 基于频率影响因素的低频减载策略 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 61-67. DOI: 10.7500/AEPS20150608006.

CEN Bingcheng, HUANG Yong, LIAO Qingfen, et al. Under-frequency load shedding strategy based on frequency influence factors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 61-67. DOI: 10.7500/AEPS20150608006.

[11] NELDE J A, MEAD R. A simplex method for function minimization [J]. The Computer Journal, 1965, 7(4): 308-313.

[12] 黄杰, 陈武晖, 董德勇, 等. 面向风电场 SSO 抑制的 TCSC 参数电磁暂态智能优化方法[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2411-2417.

HUANG Jie, CHEN Wuhui, DONG Deyong, et al. EMTP-based smart optimization of TCSC parameters oriented for mitigating wind farm SSO [J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2411-2417.

李兆伟(1985—),男,硕士,工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定分析与控制。E-mail: lizhaoweil@sgepri.sgcc.com.cn

吴雪莲(1989—),女,通信作者,硕士,助理工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定分析与控制。E-mail: wuxuelian@sgepri.sgcc.com.cn

庄侃沁(1976—),女,硕士,高级工程师,主要研究方向:电力系统稳定分析工作。E-mail: Zhuang_kq@ec.sp.com.cn

(编辑 孔丽蓓)

Analysis and Reflection on Frequency Characteristics of East China Grid After Bipolar Locking of “9·19” Jinping-Sunan DC Transmission Line

LI Zhaowei^{1,2}, WU Xuelian^{1,2}, ZHUANG Kanqin³, WANG Liang³, MIAO Yuancheng³, LI Bijun^{1,2}

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

2. NARI Technology Co. Ltd., Nanjing 211106, China;

3. East China Branch of State Grid Corporation, Shanghai 200120, China)

Abstract: The frequency security and stability situation in low load mode is worsening. The key factors which affect the frequency response are analyzed from the point of view of the load model, turbine-governors and drum boiler in the “9·19” incident. On the basis of measured values, the load frequency factor, the parameters of primary frequency modulation limit, frequency coefficient, and main steam pressure are identified. The results reflect the dynamic frequency trajectory of the “9·19” incident successfully. According to the results of reconstitution, relevant recommendations are put forward.

This work is supported by State Grid Corporation of China.

Key words: frequency; turbine-governors; main steam pressure; parameter identification