

发电厂内强迫共振型低频振荡源的定位方法

董清,王莹

(华北电力大学 电气与电子工程学院,河北 保定 071003)

摘要:强迫共振型低频振荡严重危害了电网的安全稳定运行,快速查找并切除扰动源对消除振荡恢复系统稳定意义重大。利用低频扰动电压的衰减特性,提出一种发电厂内强迫共振型低频振荡源定位的新方法。首先利用三次 Hermite 插值函数提取各个测点的低频振荡扰动变量;然后通过比较各个测点扰动电压的幅值大小定位低频振荡源机组;最后通过理论分析、六机无穷大系统的仿真分析以及某发电厂的实测相量测量单元测量数据的分析,对该方法的正确性进行了验证。

关键词:发电厂;强迫共振型低频振荡;扰动源定位;电压衰减;稳定

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.07.016

0 引言

随着电力系统网架结构的增强以及系统中各类阻尼控制装置的完善,目前传统的弱阻尼型低频振荡已经较少发生,而由发电机调速控制系统耦合干扰造成的强迫共振型低频振荡 CRLFO (Compelled Resonance Low Frequency Oscillation) 成为低频振荡事故的主要形式^[1-2]。强迫振荡严重危害了电网的安全稳定运行,快速准确地发现扰动源机组的位置并采取及时的控制措施,对于消除低频振荡恢复系统稳定具有重要意义^[3-6]。

针对低频振荡问题,主要有 2 个方面的研究:一方面是研究低频振荡特征参数的辨识方法^[7-11],另一方面是研究低频振荡源定位方法。对于低频振荡源定位方法的研究主要集中在能量函数及行波检测等方面。能量函数法主要针对区域振荡模式,通过关键节点所连接支路的势能流入、流出节点情况在线判断扰动源的大致方位^[12-16];文献[12-13]研究了发电机能量消耗与阻尼转矩间的关系,提出了一种利用电网中的振荡能量流定位振荡源的方法;文献[14-15]提出了割集能量的概念和计算方法,并采用力矩分解法将扰动源精确定位;文献[16]利用区域电网断面和分区断面的耗散能量锁定扰动源所在的分区,提出了一种计及相量测量单元(PMU)信息不可观性的强迫功率扰动源定位方法。但是以上利用能量函数法定位低频振荡源的不足之处是:算法复杂不利于扰动源的快速定位,且电网频率偏移产生的相位计算误差会造成误定位。行波检测法基于实测的响应轨迹,依据“扰动在前,响应在后”的原理,充分考虑了系统的非线性化影响,对于局部和区域振荡模式均具有实用前景^[17-18]。文献[19]提出了利用扰动电压波形定义顺序相关度函数的定位方法。文献[20]提出一种

利用 Hermite 插值函数提取低频振荡扰动变量的方法,并将该新形式采集数据用于低频振荡扰动源定位。文献[21]通过提取各发电机组出口处的低频扰动变量,利用顺序相关度函数提取低频扰动行波到达各测点的先后次序和时差定位扰动源,但是该方法较复杂。

本文针对发电厂内强迫共振型低频振荡源的定位问题,分析了低频振荡发生时电网中低频扰动信号在电网中的变化特征;利用三次 Hermite 插值函数提取各发电机组低压侧的低频扰动变量;根据低频扰动电压的衰减特性,比较各个测点上扰动电压幅值大小,提出了一种快速定位低频振荡源机组的方法。

1 利用电压衰减特性定位低频振荡源原理

发电厂内低频强迫振荡的主要原因是:某台发电机的励磁系统(或调速系统)受到低频信号的耦合干扰,当干扰信号的频率与系统的某一固有低频振荡频率相近时将导致系统出现持续的低频振荡。低频强迫振荡源机组相当于一个能发出 50 Hz 和低频信号的调幅谐波源,该振源机组发出的低频扰动量将沿着电网向四处传播。所以当电网中发生强迫低频振荡时,可将低频振荡源等效为工频电压源和低频扰动电压源的叠加,电网中各节点处的电压变量也是包含工频分量成分和低频振荡成分,各节点处电压变量中的低频振荡成分的大小,将由低频振源在电网中的位置来决定。通过分离、提取各节点处的低频振荡电压扰动成分,并比较低频振荡电压扰动成分的幅值衰减特征,便可快速定位低频振源。

以含 2 台单元发电机组的电厂发生强迫共振型低频振荡为例进行分析,其结构简图如图 1 所示。

假设发电厂内由于发电机 G_1 励磁系统受到低频信号的干扰发生强迫共振型低频振荡,振源机组相当于一个能发出 50 Hz 和低频信号的谐波源,该振源机组发出的低频扰动量将沿着电网向四处传播。

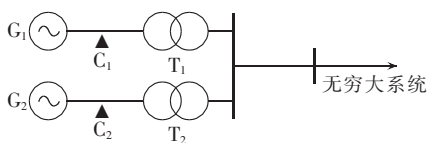


图 1 双机无穷大系统结构简图

Fig.1 Structure of 2-machine infinite system

根据叠加原理,系统的工频信号等效电路如图 2 所示,低频扰动电压源单独作用下的等效电路如图 3 所示。

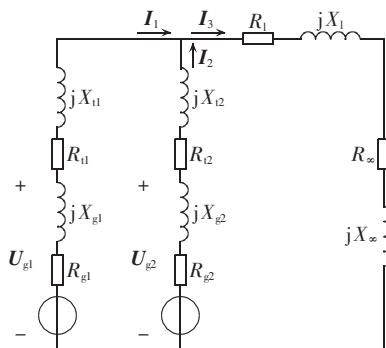


图 2 工频电压源作用下的等效电路

Fig.2 Equivalent circuit with power-frequency voltage source

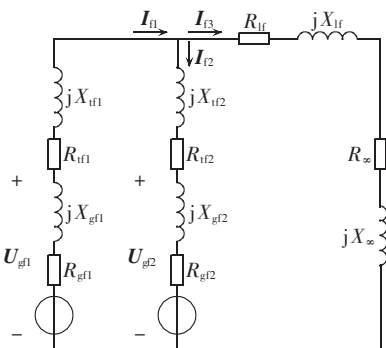


图 3 低频扰动源作用下的等效电路

Fig.3 Equivalent circuit with low-frequency disturbance source

对比图 2 和图 3 可见:当低频扰动源单独作用时,即发电机 G_1 等效为低频振荡扰动源, G_2 等效为负荷阻抗, G_1 发出的低频扰动电流经母线分流后流入发电机 G_2 。另外,在低频信号作用下,元件的阻抗参数也有一定变化,电阻 R 、电感 L 与频率无关,其电抗 X 与相应电感 L 有式(1)所示关系,即电抗值与频率成正比。

$$X = 2\pi fL \quad (1)$$

结合图 3 低频扰动源作用下的等效电路,发电机 G_1 端电压 U_{g1} 与 G_2 端电压 U_{g2} 的低频扰动电压关系为:

$$U_{g1} = U_{g2} + dU_{t1} + dU_{t2} \quad (2)$$

其中, $dU_{tn} = I_{tn}(R_{tn} + jX_{tn})$ ($n=1,2$) 表示变压器阻抗上的扰动电压降落,其幅值如式(3)所示。

$$dU_{tn} = I_{tn} \sqrt{R_{tn}^2 + X_{tn}^2} \quad (3)$$

由以上分析得出,低频扰动电压信号在传递过程中逐渐衰减,扰动源机端的低频扰动电压幅值始终高于其他机组,并且扰动电压的衰减与支路阻抗分流有关。因此可以通过比较电厂内各机端低频扰动电压幅值的大小,快速定位低频振荡源机组。

2 强迫共振型低频振荡源机组的确定方法

2.1 低频振荡扰动变量的提取方法

当发生低频强迫振荡时,电网中的工频电压变量相当于一个包含低频扰动量的调幅余弦信号^[22]。由于低频扰动分量的频率远低于 50 Hz,可以用很多方法来提取,例如傅里叶变换、小波变换、经验模态分解 EMD(Empirical Mode Decomposition)等方法^[23]。借鉴 EMD 算法^[24],本文采用插值拟合求取极大值包络线的方法提取低频振荡扰动变量。

为了减少拟合曲线的过冲和欠冲问题,本文采用分段三次 Hermite 插值函数法拟合电压的包络线。提取低频扰动分量的具体做法如下:求取电压信号的极值及其对应的时刻;利用分段三次 Hermite 插值函数拟合极值包络曲线;减去工频量获得低频电压扰动信号。

2.2 强迫共振型低频振荡源机组的具体定位方法

以含 6 台单元发电机组的电厂为例,说明利用电压衰减特性如何定位发电厂内的扰动源机组。图 4 是 6 台发电机两两并联向电网供电的结构简图, G_1 — G_6 为 6 台发电机; T_1 — T_6 为 6 台变压器;在机端安装 6 个测量单元 C_1 — C_6 。6 台发电机同时供电,监测点 C_1 — C_6 储存的电压实时数据分别为 $u_1(\tau)$ — $u_6(\tau)$ ($\tau \in [0, T]$, T 为仿真过程的时间长度)。分别提取 6 个扰动信号 $u_{n1}(\tau)$ — $u_{n6}(\tau)$,比较各个测量单元低频扰动电压波形的幅值。

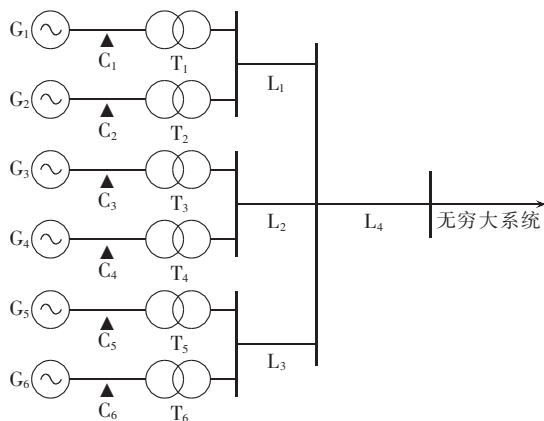


图 4 六机无穷大系统结构简图

Fig.4 Simplified structure of 6-machine infinite system

根据上述分析,如果扰动源在电厂内,扰动机组低频扰动电压幅值大于其他机组,且扰动变量的幅

值会依据实际系统结构依次降低。如果各测点间低频扰动电压的幅值相差不大,说明此时电厂内的扰动量是从高压侧母线传播到各台发电机组的,低频振荡的振荡源不在本发电厂内。

3 低频强迫振荡源机组的定位仿真分析

3.1 低频强迫振荡源机组定位仿真

参照图 4 所示的六机无穷大系统简图,建立相应的仿真模型,各发电机的惯性时间常数如表 1 所示。

表 1 发电机的惯性时间常数

Table 1 Generator inertia time constants s

H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6
3.7	3.3	2.6	2.8	2.6	3.3

发电机出口额定电压为 13.8 kV,高压侧母线额定电压为 220 kV。每台发电机机端升压变压器的低压绕组和高压绕组的参数相同,低频情况下变压器的参数见表 2,线路采用分布参数模型,长度参数见表 3。

表 2 低频情况下变压器参数的实际值

Table 2 Parameters of transformer in low-frequency condition

R_{it}/Ω	X_{it}/Ω	G_{it}/S	B_{it}/S
0.78	0.62	4.89×10^{-5}	2.487×10^{-4}

表 3 线路长度参数

Table 3 Line lengths

L_1 长度	L_2 长度	L_3 长度	L_4 长度
100	100	100	200

假设发电机 G_3 的励磁调节系统在 $t=12\text{ s}$ 时刻出现了 1 Hz 的持续干扰噪声,使 G_3 发生了 1 Hz 的低频振荡,进而引起整个电网的低频振荡。各测点都以 A 相电压为例进行分析,测点 C_4 的瞬时电压 $u_4(t)$ 如图 5 所示。

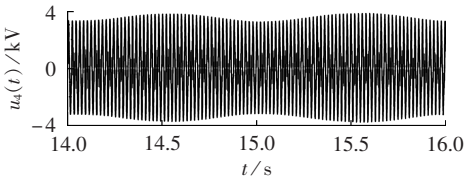


图 5 测点 C_4 的电压 $u_4(t)$

Fig.5 $u_4(t)$, voltage of measuring point C_4

由图 5 可看出,工频信号的振幅比低频扰动信号的幅值大很多,低频振荡扰动信号的特征不明显。为了提取低频扰动信号,利用分段三次 Hermite 插值法提取实时波形 $u_4(t)$ 相对应的电压包络变量 $u_{4\text{e}}(t)$,如图 6 所示。

从图 6 中可以明显看出低频振荡扰动量的变化情况。利用同样的处理方法对其他发电机机端测点实时电压数据进行处理并减去直流量,提取发电机

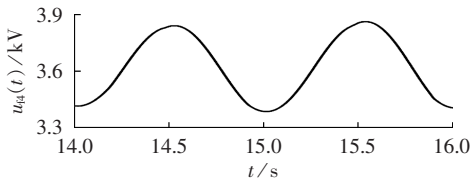


图 6 测点 C_4 的电压包络变量

Fig.6 Voltage envelope of measuring point C_4

端相对应的低频振荡电压扰动变量 $u_{\text{fl}}(t) - u_{\text{fl}}(t)$,各测点低频电压扰动量波形图如图 7 所示。

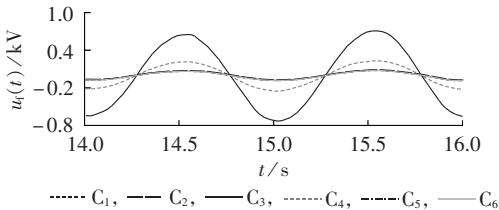


图 7 各测点低频电压扰动波形图

Fig.7 Low-frequency voltage disturbance of different measuring points

从图 7 可以明显看出,测点 C_3 的低频扰动电压的幅值明显比其他测点高很多,说明低频扰动源在测点 C_3 附近,发电机 G_3 为低频振荡源。

3.2 低频强迫振荡源机组定位仿真结果分析

下面利用扰动电压衰减特性验证仿真的正确性。六机无穷大系统在低频扰动源作用下的等效结构图如图 8 所示。

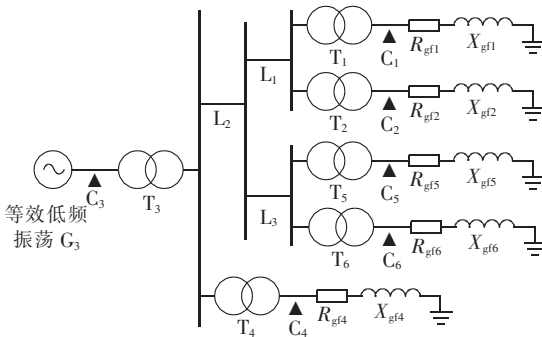


图 8 六机无穷大系统低频振荡等效结构图

Fig.8 Equivalent structure of 6-machine infinite system with low-frequency oscillation

依据图 8 电网结构图,利用仿真模型得出数据,根据式(3)和系统元件参数进行电压衰减计算,得到其他发电机机端扰动电压幅值的实测值和计算值,对比结果见表 3。

表 3 机端扰动电压实际幅值和计算幅值对比

Table 3 Comparison of generator-terminal disturbance voltage between actual and calculated magnitudes

发电机	扰动电压/V		发电机	扰动电压/V	
	实际值	计算值		实际值	计算值
G_1	78.62	76.74	G_5	78.65	76.74
G_2	78.63	76.74	G_6	78.67	76.74
G_4	231.14	228.65			

由表 3 可见,各机端扰动电压幅值计算值与实际值非常接近,验证了定位结果的正确性。可见通过比较电厂内各个监测点扰动电压信号的幅值能够快速准确地定位扰动源机组。

4 实测 PMU 数据的分析

利用某电厂 12:00—12:05 时间段内 300 s 的 PMU 实测数据进行发电厂内低频振荡源的定位分析,该电厂的系统结构图如图 4 所示。实测数据中共有发电机组 0001F、0003F、0005F、0006F 这 4 组数据,第 2 台和第 4 台机组处于检修停运状态。选取 227~229 s 内 C 相电压数据进行分析,各机组低压侧实测 PMU 的电压波形如图 9 所示。

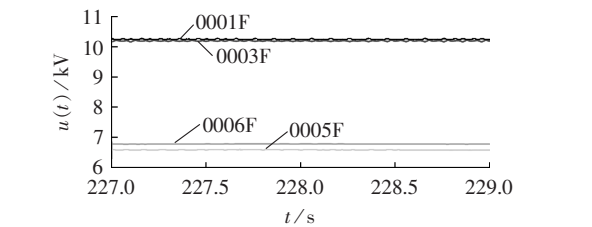


图 9 各机组实测电压波形图
Fig.9 Measured unit-voltage waveforms

图 9 中低频振荡的特征不明显且不在同一电压等级,提取各机端低频振荡电压扰动变量 $u_{f1}(t)$ 、 $u_{f3}(t)$ 、 $u_{f5}(t)$ 、 $u_{f6}(t)$ 并归算至高压侧,得到发电机机端低频电压扰动波形图如图 10 所示。

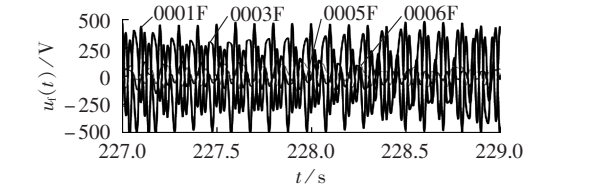


图 10 各机组低频电压扰动波形图
Fig.10 Unit-voltage low-frequency disturbances

从图中可以看出,0001F 的低频扰动电压的幅值明显高于其他机组,说明 0001F 为低频扰动源。为了验证分析结果是否正确,结合发电厂电气主接线和机组参数,利用式(3)对其余机组进行扰动电压衰减计算,计算值与实际测量值的对比结果如表 4 所示。

表 4 机端扰动电压实际幅值和计算幅值对比
Table 4 Comparison of generator-terminal disturbance voltage between actual and calculated magnitudes

发电机	扰动电压/V	
	实际值	计算值
0003F	107.524	113.657
0005F	50.469	54.460
0006F	44.483	49.869

由表 4 看出,机组 0003F、0005F、0006F 的机端扰动电压实际值和计算值均相差不大,验证了此发电厂内存在低频振荡源,振荡源机组为 0001F。

5 结论

针对发电厂内强迫共振型低频振荡源机组的定位问题,本文利用低频扰动电压的衰减特性,提出了一种发电厂内强迫共振型低频振荡源定位的新方法。并通过一个一般性的六机无穷大系统的仿真分析和某发电厂实测 PMU 数据的算例分析,验证了所提方法的正确性和准确性。

理论分析、仿真验证和实测数据分析表明该方法具有以下特点:利用实测 PMU 数据的包络线,分离并提取了低频扰动变量信号,提高了数据的利用价值;利用低频扰动电压的幅值衰减特性进行振荡源机组的定位分析,所需计算量较少、定位更准确。

参考文献:

[1] 周宏,李强,林涛,等. 基于 WAMS 量测数据的电网扰动和操作类型识别[J]. 电力自动化设备,2011,31(2):7-11.
ZHOU Hong,LI Qiang,LIN Tao,et al. Power system disturbance and operation identification based on WAMS[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(2):7-11.

[2] 宋墩文,杨学涛,丁巧林,等. 大规模互联电网低频振荡分析与控制方法综述[J]. 电网技术,2011,35(10):22-28.
SONG Dunwen,YANG Xuetao,DING Qiaolin,et al. A survey on analysis on low frequency oscillation in large-scale interconnected power grid and its control measures[J]. Power System Technology,2011,35(10):22-28.

[3] 赵晓伟,吕思昕,谢欢,等. 电力系统低频振荡综述[J]. 华北电力技术,2015(3):34-37.
ZHAO Xiaowei,LÜ Sixin,XIE Huan,et al. A survey of power system low frequency oscillation[J]. North China Electric Power,2015(3):34-37.

[4] 徐泰山,朱广飞,鲍颜红,等. 广域直流阻尼控制中多模式交互影响在线分析[J]. 电力自动化设备,2016,36(5):49-54.
XU Taishan,ZHU Guangfei,BAO Yanhong,et al. Online analysis of multi-mode interaction in wide-area HVDC damping control [J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(5):49-54.

[5] 李勇,刘子全,奚江惠,等. 一种可用于监测调速系统对低频振荡影响的方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):142-148.
LI Yong,LIU Ziquan,XI Jianghui,et al. Way to identify influence of governor system on low frequency oscillation[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(3):142-148.

[6] 徐衍会,马骢,邓小文,等. 汽轮机阀门控制方式切换引发低频振荡的实例及其机理分析[J]. 电力自动化设备,2015,35(3):170-174.
XU Yanhui,MA Cong,DENG Xiaowen,et al. Case of low-frequency oscillation induced by steam turbine valve control mode switchover and its mechanism analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(3):170-174.

[7] 李兆伟,方勇杰,李威,等. 电力系统强迫功率振荡研究综述[J]. 华东电力,2013,41(6):1188-1193.
LI ZhaoWei,FANG Yongjie,LI Wei,et al. Research survey of power system forced power oscillation[J]. East China Electric Power,2013,41(6):1188-1193.

[8] 高洁,李群湛,汪佳,等. 基于 NExT-ERA 与 SSI-DATA 环境激励下的低频振荡辨识方法比较[J]. 电力自动化设备,2016,36(1):

- 89-96.
- GAO Jie, LI Qunzhan, WANG Jia, et al. Comparison of low-frequency oscillation identification between NEX-T-ERA and SSIDATA ambient excitation methods[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 89-96.
- [9] 李国庆, 王丹, 姜涛, 等. 基于递归连续小波变换的电力系统振荡模式辨识[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 8-16.
- LI Guoqing, WANG Dan, JIANG Tao, et al. Power system oscillation mode identification based on recursive continuous wavelet transform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 8-16.
- [10] 马燕峰, 刘伟东, 赵书强, 等. 基于递推随机子空间的电力系统低频振荡辨识[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(12): 43-49.
- MA Yanfeng, LIU Weidong, ZHAO Shuqiang, et al. Low-frequency oscillation identification based on recursive stochastic subspace for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 43-49.
- [11] 姜宇成, 解大, 冯俊淇, 等. 基于三质量块模型的失速型风机小信号建模和模态分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 124-130.
- LOU Yucheng, XIE Da, FENG Junqi, et al. Small-signal modeling and modal analysis based on three-mass shaft model for stall wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 124-130.
- [12] 陈磊, 闵勇, 胡伟. 基于振荡能量的低频振荡分析与扰动源定位—理论基础与能量流计算[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 22-27.
- CHEN Lei, MIN Yong, HU Wei. Low frequency oscillation analysis and oscillation source location based on oscillation energy part one mathematical foundation and energy flow computation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 22-27.
- [13] 陈磊, 闵勇, 胡伟. 基于振荡能量的低频振荡分析与扰动源定位—振荡源定位方法与算例[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 1-5.
- CHEN Lei, MIN Yong, HU Wei. Low frequency oscillation analysis and oscillation source location based on oscillation energy part two method for oscillation source location and case studies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 1-5.
- [14] 李文锋, 郭剑波, 李莹, 等. 基于 WAMS 的电力系统功率振荡分析与振荡源定位(1)割集能量法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 41-46.
- LI Wenfeng, GUO Jianbo, LI Ying, et al. Power system oscillation analysis and oscillation source location based on WAMS part 1: method of cutset energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 41-46.
- [15] 李文锋, 李莹, 周孝信, 等. 基于 WAMS 的电力系统功率振荡分析与振荡源定位(2)力矩分解法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 47-53.
- LI Wenfeng, LI Ying, ZHOU Xiaoxin, et al. Power system oscillation analysis and oscillation source location based on WAMS part 2: method of torques decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 47-53.
- [16] 商显俊, 顾雪平, 梁海平, 等. 计及相量测量单元信息不可观性的强迫功率振荡扰动源定位[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(10): 56-62.
- SHANG Xianjun, GU Xueping, LIANG Haiping, et al. Location identification method of disturbance source in forced power oscillation considering unobservability of PMU information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 56-62.
- [17] SPOOR D, ZHU Jianguo. Improved single-ended traveling-wave fault-location algorithm based on experience with conventional substation transducer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1714-1720.
- [18] LIN Xiangning, ZHAO Feng, WU Gang, et al. Universal wave-front positioning correction method on traveling-wave-based fault-location algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1601-1610.
- [19] 董清, 梁晶, 颜湘武, 等. 大规模电网中低频振荡扰动源的定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 78-83.
- DONG Qing, LIANG Jing, YAN Xiangwu, et al. Locating method of disturbance source of low frequency oscillation in large scale power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 78-83.
- [20] 董清, 张玲, 颜湘武, 等. 电网中强迫共振型低频振荡源的自动确定方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 68-75.
- DONG Qing, ZHANG Ling, YAN Xiangwu, et al. Automatic locating source method of compelled resonance low frequency oscillation in power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 68-75.
- [21] 董清, 张玲, 颜湘武. 低频振荡扰动源机组的自动定位方法[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 265-269.
- DONG Qing, ZHANG Ling, YAN Xiangwu. Automatic location of generation units behaving as disturbance source of low-frequency oscillation[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 265-269.
- [22] 董清, 孙金竹, 尹宏杰, 等. PMU 数据用于 SCADA 时滤除低频干扰的方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2): 90-94.
- DONG Qing, SUN Jinzhu, YIN Hongjie, et al. Method for filtering noise of low frequency oscillation when using PMU data in SCADA[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 90-94.
- [23] 杨德昌, 唐巍, 屈瑞谦, 等. 基于改进局部均值分解的低频振荡参数提取[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 135-140.
- YANG Dechang, TANG Wei, QU Ruiqian, et al. Extraction of the oscillatory parameters of low frequency oscillation based on improved local mean decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 135-140.
- [24] 张之猛, 刘晨晨, 刘伯胜, 等. 经验模态分解中的包络线拟合算法仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(23): 7690-7693.
- ZHANG Zhimeng, LIU Chenchen, LIU Bosheng, et al. Simulation analysis of envelopes fitting algorithms in EMD[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(23): 7690-7693.

作者简介:



董清

董清(1970—),男,四川江津人,副教授,博士,研究方向为电力系统鲁棒控制、广域测量系统的应用技术(E-mail: dq.d@163.com);

王莹(1990—),女,河北保定人,硕士研究生,研究方向为广域测量系统的应用技术(E-mail: wangyingncepu@163.com)。

(下转第 129 页 continued on page 129)

戴维南等值参数时域仿真跟踪算法分析与改进

赵建伟¹, 严 正¹, 徐潇源¹, 冯 楠², 崔 勇², 曹 路³, 李建华³

(1. 上海交通大学 电气工程系 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240;

2. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437; 3. 华东电网有限公司, 上海 200210)

摘要: 从物理意义和数学假设两方面对现有的 2 种基于时域仿真的戴维南等值参数跟踪算法进行了详细的分析, 揭示了两者的本质和算法实现上的差异。针对系统中所有负荷节点的处理方式, 对现有 2 种算法进行了修正, 使两者在物理本质、数学前提和计算结果三方面实现了统一。在统一现有算法的基础上, 为了尽量减小“两状态法”可能带来的误差, 以原算法的前提假设为出发点, 对不同类型的发电机节点和负荷节点分别按照不同的方式进行处理, 提出了改进的戴维南等值参数时域仿真跟踪算法。以等阻抗模判据为依据, 通过稳态和暂态实例验证了改进算法能够更加准确地判断电力系统的电压稳定性。

关键词: 戴维南等值参数; 时域仿真; 跟踪算法; 电压稳定

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.07.017

0 引言

基于戴维南等值的电压稳定分析方法因其物理概念明确、模型简单、能极大地简化电网结构、清晰地表征电力系统的电压稳定性, 而受到广泛关注^[1-4]。应用戴维南等值进行电压稳定分析的前提是求取戴维南等值参数。但由于电力系统的时变特性, 戴维南等值参数受系统网络拓扑、发电状况、无功源状况、负荷状况及故障扰动等诸多因素影响。如何对不断变化的戴维南等值参数进行跟踪估计就成了关键所在。

Vu K. 和 Begovic M. M. 等人率先针对实际电网提出运用本地测量数据跟踪估计戴维南等值参数的方法^[5], 具有里程碑式的意义。之后国内外学者又相继提出了多种戴维南等值参数跟踪算法^[6-26], 主要可概括为以下 3 种。第 1 种是基于本地测量或潮流计算的算法: 利用测量单元或潮流计算得到运行点及其邻域的多组数据, 通过黑箱模型和最小二乘辨识方法计算一组戴维南等值参数。这种算法假设运行点邻域内系统的戴维南等值参数保持不变, 可能出现参数漂移问题^[16]。第 2 种是基于偏差校正^[17-18]或全微分^[19-20]的算法: 针对参数漂移问题做出了改进, 偏差校正是在戴维南等值参数计算结果的基础上进行修正, 克服了等值参数恒定的假设; 基于全微分的算法是利用节点功率方程对戴维南等值参数及母线电压取全微分联立形成方程组, 再求解对应的差分方程组得到等值结果, 同样考虑了相邻运行点之间等值参数的变化。第 3 种是基于时域仿真的算法^[21-22]: 将时域仿真中的每一个时间步都作为一个运行点, 每个运行点根据时域仿真软件提供的系统参数和

状态数据计算一组戴维南等值参数, 从而实现对戴维南等值参数的实时跟踪。

从戴维南等值参数跟踪算法的发展情况来看, 研究重点集中在 2 个方面。一是提高算法准确性, 例如: 如何避免参数漂移, 如何考虑运行点邻域内等值参数的变化。针对这一方面的解决方法众多, 但都未能从根本上解决多个运行点计算单一戴维南等值参数所带来的局限。二是扩大算法适用性。大多数算法的本质为静态方法, 仅适用于稳态情况或变化缓慢的中长期过程。而对于电压稳定问题而言, 更多关注大小扰动下系统的暂态电压稳定性。因此如何实现电力系统暂态过程中的实时戴维南等值, 是需要克服的难题, 也是当前研究的主要关注点^[21-25]。

事实上, 不论是算法的准确性还是适用性, 其根本问题在于将线性电路的戴维南等值原理直接引入强非线性的电力系统中。不同时间断面的系统状态和等值参数都是不同的, 导致了采用多个运行点数据求取单一戴维南等值参数的算法都存在类似的局限性。针对这一问题, 文献^[21-22]提出了基于时域仿真的戴维南等值参数跟踪算法, 其出发点是基于单个时间断面进行戴维南等值参数的计算。从多时间断面到单时间断面, 既可以有效避免参数漂移等问题, 又能够基于实时测量数据或仿真数据实现对大小扰动下系统暂态过程中戴维南等值参数的跟踪, 为暂态电压稳定性分析提供了一条有益的途径。这类算法目前仍被普遍认为是“没有基于任何假设前提的”以及“精确的”^[20-21, 26-27]。

本文在文献^[21-22]的基础上对基于时域仿真的戴维南等值参数跟踪算法进行进一步研究, 主要包含两方面内容: 对现有 2 种不同算法做了详细的分析和比较, 并分别进行了修正, 使两者在物理含义、数学前提和计算结果三方面实现统一; 在现有 2

收稿日期: 2016-05-26; 修回日期: 2017-03-09

基金项目: 国家电网公司科技项目 (52094015001S)

Project supported by the Science and Technology Program of SGCC (52094015001S)