

基于 CBR 和 OAPID 的互联电网区间模式振荡预警

徐遐龄¹, 林 涛², 高玉喜², 张 帆²

(1. 华中电力调控分中心, 湖北 武汉 430077; 2. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 采用基于广域测量系统(WAMS)的量测数据, 提出基于范例推理(CBR)理论及功率振荡增量分布(OAPID)理论的互联电网区间模式振荡预警方法。该方法在系统未发生低频振荡时进行区间模式振荡预警; 在系统发生振荡时提供系统运行方式的调整建议来改善系统阻尼。某区域电网 WAMS 实测数据的测试结果验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词: 电力系统; 稳定性; 区间模式振荡; 范例推理; OAPID; WAMS

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.08.015

0 引言

随着大区互联电力系统的出现和扩大, 小干扰稳定问题日益突出^[1-2]。我国互联电网由于送电距离较长、电压支撑薄弱, 各区域间振荡模式多表现为较低频率的负阻尼或弱阻尼, 易引发系统的低频振荡^[3]。因此, 对电网小干扰稳定性进行在线预警, 对低频振荡的防御和抑制有重要作用, 一旦系统中发生了低频振荡事件, 则要迅速采取正确的调整措施平息振荡。

文献[4]采用分布式算法计算小干扰稳定性, 在保证各分区电网相对独立的前提下分解计算任务, 通过高速通信网络协调传递边界状态变量完成全网计算任务。这种方法协调求解计算过程较为复杂且受通信网络延迟影响。文献[5]采用工作站集群运行“端口逆矩阵并行解法”在线求解互联电网的特征值。与基于能量管理系统 EMS(Energy Management System)数据的特征值在线计算不同, 广域测量系统 WAMS(Wide Area Measurement System)的广泛应用为从电网固有振荡特性角度分析电网小干扰稳定性提供了可能。区域电网 WAMS 通过 Prony 算法能够在线辨识低频振荡模式信息^[6], 但难以在线确定强相关机组以抑制低频振荡。

文献[7]中提出综合模式分析法来获取振荡模态, 即先离线计算确定运行方式下系统特征值, 在时域仿真基础上用 Prony 算法辨识联络线功率振荡模式, 最后在特征值计算结果中查找相同或相近模式对应的强相关机组, 通过投入电力系统稳定器 PSS(Power System Stabilizer)并合理配置其参数来提高抑制联络线功率振荡的能力。该方法如何适应运行方式的变化需要进一步研究, 且一般系统中 PSS 已投入, 如果实际中仍发生低频振荡需要寻求其他控制

手段。文献[8]中依据 WAMS 记录的低频振荡统计分析振荡模式特征, 解决特征值法在系统模型和参数不准确时存在的模式遗漏和偏差问题, 但没有提供相应的抑制措施。文献[9]提出了一种基于机组出力调整的小干扰稳定辅助决策计算方法, 该方法利用特征值计算所得参与因子信息及灵敏度信息确定机组出力调整量, 并考虑了协调控制多个弱阻尼模式的机组出力调整措施。该方法是解决实际问题为出发点, 但需要在线计算特征值。

电网中低频振荡常以某种规律和特征多次出现, 调度人员也常采取相似的措施来平息振荡^[8]。若对常发低频振荡或弱阻尼模式进行系统研究, 提取其规律和特征及相应的控制措施, 则电网中出现类似振荡或弱阻尼模式时, 通过特征匹配可提供给调度人员系统的小干扰稳定性预警并获取控制措施, 保障电网稳定运行。特征值法虽然能描述低频振荡特征, 但在线计算特征值实时性较差。

本文提出了基于范例推理 CBR(Case-Based Reasoning)和功率振荡增量分布 OAPID(Oscillatory Active Power Increment Distribution)的互联电网区间模式振荡预警方法。该方法依据 WAMS 量测数据, 在系统未发生区间模式低频振荡时, 以方式相似程度作为特征量进行范例正匹配, 并根据匹配所得方式的特征值信息对当前方式区间振荡模式的阻尼进行评估, 当认为当前方式下系统阻尼不足时, 则将正匹配所得方式的弱阻尼模式频率及参与因子信息也作为特征量参与范例反匹配, 给出调节建议, 提高当前运行方式区间振荡模式的阻尼; 当发生低频振荡时, 则利用 TLS-ESPRIT 辨识方法对 WAMS 记录振荡波形进行 OAPID 计算, 迅速得到主导模式对应频率及发电机、线路、负荷等的参与程度及相位关系, 与方式相似程度一起作为特征量进行正匹配, 并利用正匹配所得方式及对应低频振荡模式的频率、参与因子信息通过反匹配得到系统当前运行方式的调整建议。

收稿日期: 2013-01-25; 修回日期: 2013-07-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50707021)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50707021)

1 理论概述

1.1 CBR 理论

CBR 是人工智能领域一项重要的推理方法,其核心思想是对经验和知识进行结构化存储,进而实现判断与推理^[11]。一个完整的 CBR 系统一般由范例的表示及组织、检索及匹配、重用和修正、新范例的添加等过程组成。

当 CBR 应用于电力系统小干扰稳定预警时,基本范例由问题的一系列特征属性向量和问题解向量组成。一个典型的基本范例单元可定义为一个二元组:

$$c_i = \langle p_i, s_i \rangle \quad (1)$$

其中, $p_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}\}$ 是一个非空有限集合,表征了运行状态的相关信息,包括发电机出力、负荷功率、母线电压、线路电流等,称为条件属性; s_i 表示当前运行方式下各区间振荡模式的特征值、振荡频率、阻尼比、特征向量或参与因子(如果无法得到特征向量)、运行方式灵敏度等信息,为决策属性。

为消除各指标的量纲效应和规范各指标的变化范围,使建模具有一般性,还需要对条件属性数据进行标准化处理,完成范例单元 c_i 的表示及组织。将包含不同条件属性和决策属性的范例单元 c_i 按线性列表结构进行存储,便可形成历史范例库 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$,用于范例检索与匹配。

范例检索是利用范例库的索引机制,根据范例相似性量度方法,从范例库中找到与当前求解问题最相似的一个范例(或范例集)作为当前待求解问题的解^[12]。实际的范例相似性匹配包括 2 个步骤:根据范例特征描述,评估新范例和旧范例的各特征属性之间的相似性;根据相似性匹配函数,评估新范例与旧范例的综合相似程度。具体而言,实际的范例相似度可由下式定义:

$$S(C_a, C_b) = \sqrt{\sum_{k=1}^n w_k \left[1 - \left(\frac{f_k - a_k}{R_k} \right)^2 \right]} \quad (2)$$

其中, $C_a = [f_1, f_2, \dots, f_n]$ 为新范例, f_k 为新范例属性; $C_b = [a_1, a_2, \dots, a_n]$ 为范例库中的历史范例, a_k 为历史范例属性; w_k, R_k 分别为范例单元中第 k 个特征属性的权值和取值范围,其值视具体的物理量类型而定。新范例通过检索和匹配后,得到与之最相似范例。由于相似范例和新范例相似度较高,且前者决策属性包含的特征值、阻尼比等信息已知,故可用来评估后者的小干扰稳定程度。

当系统出现与范例库中的方式差异较大的新方式时,则匹配相似度较低,此时可按照同样的范例表示方式将其组织成新范例并存入范例库中。

1.2 基于 TLS-ESPRIT 辨识的 OAPID

OAPID 的理论计算方法需要得到系统状态模型

以及特定振荡模式的特征向量,难以满足 OAPID 的在线应用要求。文献[10]经过分析指出:用 Prony 辨识法代替理论算法对 OAPID 进行辨识计算,可获得同样的分析结果。相对于 Prony 算法,本文则选取抗噪声性能优良、算法参数适应性更好、辨识精度更高的 TLS-ESPRIT 辨识算法^[13]进行 OAPID 的计算,计算过程如下:

a. 确定电网中需要参与 OAPID 计算的发电机、传输线路及负荷等;

b. 获取相应功率振荡波形,选择 TLS-ESPRIT 算法参数对功率信号进行辨识,得到相关模式的功率振荡增量分布;

c. 对辨识出的发电机、线路及负荷的 OAPID 计算结果,相对于幅值最大值对 OAPID 幅值进行归一化处理,并以 OAPID 最大幅值对应相位为基准,得到 OAPID 相对相位信息。

基于 TLS-ESPRIT 辨识的 OAPID 计算方法所得结果能够在避免特征值计算的情况下反映模式特征向量,从而作为特征量参与范例匹配的模式匹配,与方式相似度配合,寻找与当前低频振荡方式相似的范例及对应的模式。

2 基于 CBR 的电网小干扰稳定性预警步骤

一般认为机电振荡模式的阻尼比大于 0.03 或 0.05 时系统是小干扰稳定的。当系统阻尼不足时,在扰动作用下会出现小干扰不稳定状况。考虑到区域电网结构数据不变的情况下,其小干扰稳定性主要取决于系统的运行方式;通过对实际低频振荡波形进行分析,可以根据振荡频率及相位信息从系统特征值计算结果中找到对应振荡模式^[7,10]。同时,电网中低频振荡特别是区间模式振荡常以某种规律和特征多次出现,调度人员也常采取相似的措施来平息振荡。因此,可以根据 WAMS 记录的低频振荡信息和对应运行方式离线建立历史范例库,依据范例推理理论通过范例匹配对当前运行方式下是否出现类似的小干扰稳定问题进行预警。

基于范例推理的互联网区间模式振荡预警步骤如下。

(1) 离线建立历史范例库。

在电力系统仿真软件中建立电网动态模型,根据从 EMS 中获得的运行方式数据进行仿真复现^[14-16]、小干扰稳定分析,对于实际区间模式振荡事件或包含弱阻尼机电模式的运行方式,还需要基于仿真模型激发相应模式的振荡并选择 WAMS 能够监测到的发电机及线路进行 OAPID 计算,并将相应的计算分析结果存入范例库中。按是否出现低频振荡将范例库分为无低频振荡库和有低频振荡库 2 类(以下

分别简称库 I 和 II),其结构如表 1 所示。

表 1 范例库结构及存储内容
Tab.1 Structure and storage content of case base

对象	库 I (无低频振荡)	库 II (有低频振荡)
方式类型	实际未发生低频振荡事件的运行方式	1. 实际发生的低频振荡事件 2. 仿真所得弱阻尼低频振荡运行方式
存储信息	1. 运行方式信息 2. 对应特征值计算结果及参与因子信息	1. 运行方式信息 2. 对应特征值计算结果及参与因子信息 3. OAPID 计算结果

(2) 基于WAMS量测数据的范例匹配流程。

基于 WAMS 量测数据的范例匹配根据系统是否发生低频振荡分 2 种情况进行匹配,为了便于对匹配流程进行描述,现对不同情况下的范例正、反匹配所用特征量及匹配所得决策属性进行总结,如表 2 所示。

表 2 范例正、反匹配内容
Tab.2 Content of case matching and rematching

匹配	对象	系统无低频振荡	系统发生低频振荡
正匹配	参与匹配内容	运行方式信息	运行方式信息及 OAPID 计算结果
	匹配所得决策属性	方式对应特征值计算结果及参与因子信息	方式对应低频振荡模式及参与因子信息
反匹配	参与匹配内容	正匹配所得运行方式信息	正匹配所得运行方式信息及振荡对应模式和对应的参与因子信息
	匹配所得决策属性	方式对应特征值计算结果及参与因子信息	方式对应特征值计算结果及参与因子信息

a. 系统未发生低频振荡。

若 WAMS 未检测到低频振荡发生,此时将 PMU 上传的运行方式数据与范例库 I 中的范例进行正匹配,得到与当前运行方式最相似的范例,并将匹配所得范例决策属性对应参数近似作为当前运行方式下电网区间振荡模式阻尼评估结果。

若匹配所得范例的模式阻尼比大于设定的预警阈值,说明系统当前方式的区间振荡模式阻尼较高,匹配过程结束;若匹配所得范例存在区间振荡弱阻尼模式,则进行预警,在范例库 I 中进行反匹配,将得到的相似度最高的小干扰稳定运行方式作为调节建议;若正、反匹配过程中所得方式相似度均小于阈值,则建议将当前运行方式进行仿真复现,作为新范例添加到数据库中。

b. 系统已发生低频振荡。

若 WAMS 已检测到区间模式低频振荡,则进入范例库 II 进行正匹配,再根据正匹配结果进入范例库 I 进行反匹配。此时利用正匹配所得方式代替当前运行方式进行方式相似度计算,进行匹配后得到调节建议。

3 基于区域电网 WAMS 实测数据的算例研究

本文采用某区域电网 WAMS 实测数据进行验证,预警阈值取为 5%。

3.1 正常运行工况

2008 年底,某两大区域电网(以下简称区域 A、B)间进行了特高压联网试验,根据试验期间 WAMS 记录的运行方式数据,在库 I 中进行正匹配,结果如表 3、4 所示。

表 3 正匹配所得方式及对应振荡模式信息

Tab.3 Operating mode and corresponding oscillation mode obtained by matching					
方式	相似度	特征值实部	特征值虚部	频率/Hz	阻尼比/%
11	0.9378	-0.2994	3.2371	0.5152	9.21

表 4 振荡模式强相关机组及参与因子

Tab.4 Correlative generators and participation factors			
相关机组		参与因子	
JHF-G1	0.0140	MHS-G6	0.0066
JLD-G2	0.0082	MHX-G1	0.0061
MLD-G2	0.0081	MHX-G2	0.0061
MLD-G1	0.0081	JLD-G1	0.0057
JYE-G2	0.0066	JSE-G1	0.0055

由表 3 看出,正匹配所得方式最低阻尼比大于整定值(5%),认为系统处于区间振荡模式较强阻尼运行状态,不需要通过反匹配给出调整运行方式的建议。

3.2 低频振荡工况

2009 年 5 月,区域 A 电网 WAMS 监测到 YHJ 变电站附近线路发生有功功率波动,监测振荡频率为 0.808 Hz。依据 WAMS 量测所得运行方式数据及 OAPID 计算结果在库 II 中进行正匹配,方式 1 与 WAMS 量测运行方式数据相似度较高(0.831 249),且频率相近模式的 OAPID 结果也相近,OAPID 比较结果如表 5 所示,表中数据为归一化后数值。

a. 以排序前 10 位的发电机、线路中相同发电机、

表 5 WAMS 实测数据与方式 1 相近模式的 OAPID 结果对比

Tab.5 Comparison between actual WAMS data and results of OAPID corresponding to operating mode 1

方法	功率	DBS-TP1 线	YSH-G3	YSH-G4	YYM-G5	YQB-G2	YMS-G1	KH-XF1 线	YHB-G5	YQB-G3	YYH-G3
WAMS 实测	相对幅值	1	0.439	0.397	0.338	0.263	0.261	0.239	0.213	0.192	0.191
OAPID	相对相位	0	-46.689	-51.736	-28.278	-41.620	-45.445	-14.317	61.859	67.962	-35.562
方法	功率	DBS-TP1 线	YSH-G3	YSH-G4	YYM-G5	YQB-G2	YMS-G1	KH-XF1 线	YHB-G5	YQB-G3	YQB-G4
范例库存储	相对幅值	1	0.597	0.547	0.373	0.493	0.273	0.483	0.478	0.548	0.547
OAPID	相对相位	0	72.671	80.288	5.200	11.547	37.034	29.506	8.555	30.631	30.759

线路所占比例作为判断相似性的指标 1。此算例对应指标值为 90%。

b. 以幅值最大机组(或线路)为标准,相对相位为 0°,对其他相对相位位于 -45°~45° 及 135°~225° 的机组、线路进行统计,作为指标 2,如表 6 所示。

表 6 WAMS 实测数据与方式 1 相近模式的 OAPID 相对相位分析

Tab.6 Analysis of relative phase between actual WAMS data and results of OAPID corresponding to operating mode 1

机组及线路 按相位分群	WAMS 实测 OAPID 结果	范例库存储 OAPID 结果
-45°~45°	YYM-G5、YQB-G2、 KH-XF1 线	YYM-G5、YQB-G2、 YMS-G1、KH-XF1 线、 YHB-G5、YQB-G3
135°~225°	无	无

c. 根据排序中前 10 位机组、线路中相同机组、线路所占比例(指标 1,达 90%)及相对相位关系(指标 2,为 75%),可认为 WAMS 实测振荡波形的 OAPID 结果与方式 1 中频率相近模式的 OAPID 结果相似度较高。

综合方式相似度、频率差值、OAPID 相似度,最终选取方式 1 作为正匹配结果,相应小干扰稳定计算结果及参与因子信息如表 7、8 所示。

表 7 正匹配所得方式及对应振荡模式信息

Tab.7 Operating mode and corresponding oscillation mode obtained by matching

相似度	特征值实部	特征值虚部	频率/Hz	阻尼比/%
0.8312	-0.0731	4.3558	0.6933	1.68

表 8 振荡模式强相关机组及参与因子

Tab.8 Correlative generators and participation factors

相关机组	参与因子	相关机组	参与因子
YSY-G3	0.4898	YQB-G1	0.0004
YSY-G1	0.0020	YMQ-G1	0.0004
YSY-G2	0.0020	YQB-G2	0.0003
YDBS-G1	0.0009	YHB-G6	0.0003
YDBS-G2	0.0008	YQB-G4	0.0003

从表 7、8 可以看出,在低频振荡发生情形下,正匹配得到的振荡模式与 WAMS 监测结果相符合。

比较表 5、表 8 还可以看出,表 8 中按参与因子大小排序所得前 10 位的强相关机组中,500 kV 层面机组(YQB、YDBS)均能在表 5 中找到对应机组(YQB)或相应的发电机出线(DBS-TP),这也进一步证明,OAPID 方法与特征值法一样,对低频振荡特征的分析结果是一致的。

为进一步验证正匹配结果的正确性,本文对此次低频振荡事件进行了仿真复现计算:在电力系统综合分析软件包 PSASP V6.25 中,依据 EMS 记录的稳态运行时系统潮流分布数据,采用文献[14-16]中方法,复现出振荡发生前系统的稳态运行方式,并在此

基础上进行小干扰稳定计算。正匹配校核结果如表 9、10 所示。

表 9 与实际运行方式相对应的小干扰稳定计算结果

Tab.9 Result of small signal stability calculation corresponding to actual operating mode

特征值实部	特征值虚部	频率/Hz	阻尼比/%
-0.0646	4.6168	0.7348	1.3988

表 10 相应强相关机组及参与因子

Tab.10 Correlative generators and participation factors

相关机组	参与因子	相关机组	参与因子
YSY-G3	0.4846	YLY-G1	0.0003
YSY-G2	0.0046	YQB-G3	0.0003
YSY-G1	0.0035	YQB-G4	0.0003
YDBS-G1	0.0007	YQB-G2	0.0002
YDBS-G2	0.0007	YKH-G7	0.0002

对比表 7、8 和表 9、10 可见,正匹配所得运行方式对应模式与此次低频振荡事件仿真复现方式对应模式在振荡频率、阻尼比、强相关机组及参与因子排序上都非常接近,说明匹配结果与电网实际情况相符合,表明正匹配结果正确。利用正匹配所得运行方式信息及参与因子信息进入库 I 进行反匹配,选取方式 40 作为反匹配结果,给出调节建议。匹配结果如表 11、12 所示。

表 11 反匹配所得方式及对应振荡模式信息

Tab.11 Operating mode and corresponding mode obtained by rematching

相似度	特征值实部	特征值虚部	频率/Hz	阻尼比/%
0.9360	-0.3363	5.5759	0.8874	6.0203

表 12 强相关机组及参与因子

Tab.12 Correlative generators and participation factors

相关机组	参与因子	相关机组	参与因子
YSY-G3	0.3391	YSH-G3	0.0015
YSY-G1	0.0922	YSH-G4	0.0015
YSY-G2	0.0907	YQB-G3	0.0012
YDBS-G1	0.0031	YQB-G4	0.0012
YDBS-G2	0.0025	YLY-G1	0.0010

比较表 12 和表 10 可以看出,反匹配所得方式对应模式与实际运行方式仿真复现所得模式在频率、强相关机组及参与因子排序上均比较接近,可以认为反匹配搜索到了正确的模式。比较表 11 和表 9 可看出,反匹配所得方式对应模式阻尼已有较大提高。

最后需要根据反匹配所得方式对当前运行方式进行调节,选取和当前方式相似度较高的 8 位厂(站)的运行方式数据作为调节建议,如表 13 所示。

根据表 13 所给出的调节建议修正当前运行方式后,为验证根据调节建议的有效性,对调节后运行方式进行小干扰稳定计算。所得结果如表 14 所示。

可以看出,调节后所得运行方式下该模式的阻尼得到了较大程度的提高。

表 13 反匹配所得的建议运行方式
Tab.13 Suggested operating mode obtained by rematching

节点名	传输线路	节点相似度	实际有功/MW	实际无功/Mvar	实际电压/kV	建议有功/MW	建议无功/Mvar	建议电压/kV
SMX	SH-SZ1 线	0.894069	281.219	-59.3527	534.786	272.431	145.650	534.0540
YM	YM-ZZ 线	0.942786	460.879	45.0442	543.592	515.376	-141.010	531.3013
DGH	ML-DGH1 线	0.953050	-137.331	-59.3271	535.695	-141.823	45.150	534.5609
SH	SH-YX1 线	0.962521	409.793	-18.6769	535.124	392.479	-159.021	529.5052
XL	YX-XL1 线	0.972387	-288.500	-60.5000	535.317	-286.861	-184.527	535.3411
NS	ZJB-ES1 线	0.973381	65.000	0	534.294	70.423	117.225	531.5390
ZY	SXZY-LQ1 线	0.987137	1087.500	83.5000	536.597	1176.127	-10.398	531.6036
DJ	DJ-CH1 线	0.987445	142.550	-23.8957	533.578	197.824	44.041	535.4831

表 14 按调节建议修正后的运行方式下
小干扰稳定计算结果
Tab.14 Result of small signal stability calculation
corresponding to suggested operating mode

实部	虚部	频率/Hz	阻尼比/%
-0.2972	5.4466	0.8669	5.4481

4 结语

本文提出了基于 CBR 理论及 OAPID 理论的互联电网区间模式振荡预警方法,其基于 WAMS 量测数据,有效利用 WAMS 监测的电网中已发生的区间模式低频振荡事件及其控制规律和经验,实现互联电网区间模式振荡预警和提供辅助建议,具有实际应用价值。

某区域电网 WAMS 量测数据的测试结果验证了该方法可在系统未发生区间模式低频振荡时进行预警,发生振荡时提供系统运行方式的调整建议来改善系统阻尼。

参考文献:

[1] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社,2004:9.
[2] 周双喜,苏小林. 电力系统小干扰稳定性研究的新进展[J]. 电力系统及其自动化学报,2007,19(2):1-8.
ZHOU Shuangxi,SU Xiaolin. Advance of study on small disturbance stability of power systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007,19(2):1-8.
[3] 董明齐,刘文颖,袁娟,等. 基于增加联络线的互联电网低频振荡抑制方法[J]. 电力系统自动化,2007,31(17):94-98.
DONG Mingqi,LIU Wenying,YUAN Juan,et al. Low-frequency damping method of interconnected power grids by increasing tie-lines[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(17):94-98.
[4] 张旭,沈沉,梅生伟,等. 基于自激法的小干扰稳定特征值的分布式算法[J]. 电力系统自动化,2007,31(13):12-16.
ZHANG Xu,SHEN Chen,MEI Shengwei,et al. Distributed AE-SOPS algorithm for eigenvalue analysis of small signal stability[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(13):12-16.
[5] 李芳,郭剑,吴中习,等. 基于 PC 机群的电力系统小干扰稳定分布式并行算法[J]. 中国电机工程学报,2007,27(31):8-13.
LI Fang,GUO Jian,WU Zhongxi,et al. Distributed parallel computing algorithms for power system small signal stability based on PC clusters[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(31):8-13.
[6] 陈树恒,李兴源. 基于 WAMS 的低频振荡模式在线辨识算法[J].

继电器,2007,35(20):17-22.
CHEN Shuheng,LI Xingyuan. An algorithm for identifying low frequency oscillation modes on line based on WAMS[J]. Relay,2007,35(20):17-22.
[7] 杨慧敏,文劲宇. 基于模式综合分析法的联络线功率振荡抑制措施[J]. 电力系统自动化,2009,33(9):91-95.
YANG Huimin,WEN Jinyu. Damping power oscillation on transmission line based on mode-synthesis analysis method[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(9):91-95.
[8] 邱夕兆,于占勋,雷鸣,等. 山东电网基于 WAMS 的低频振荡统计与评估[J]. 电力系统自动化,2008,32(6):95-98.
QIU Xizhao,YU Zhanxun,LEI Ming,et al. WAMS based statistics and assessment of low frequency oscillation in Shandong Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(6):95-98.
[9] 鲍颜红,徐伟,徐泰山,等. 基于机组出力调整的小干扰稳定辅助决策计算[J]. 电力系统自动化,2011,35(3):88-91.
BAO Yanhong,XU Wei,XU Taishan,et al. Small-signal stability auxiliary decision-making calculation based on power generation adjustment[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(3):88-91.
[10] 武诚,徐政,郑翔. 基于 PSS/E 的功率振荡增量分布计算[J]. 电网技术,2009,33(4):38-42.
WU Cheng,XU Zheng,ZHENG Xiang. Calculation of oscillatory active power increment distribution based on PSS/E[J]. Power System Technology,2009,33(4):38-42.
[11] 郭艳红,邓贵仕. 基于事例的推理(CBR)研究综述[J]. 计算机工程与应用,2004,40(21):1-5.
GUO Yanhong,DENG Guishi. Review of case-based reasoning[J]. Computer Engineering and Applications,2004,40(21):1-5.
[12] 王志勇,郭创新,曹一家. 改进范例推理在短期负荷预测中的应用[J]. 电力系统自动化,2005,29(12):33-37.
WANG Zhiyong,GUO Chuangxin,CAO Yijia. Improved case-based reasoning for short-term load forecasting[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(12):33-37.
[13] 林涛,刘淑芬,刘林,等. 两种电力系统低频振荡波形分析方法比较[J]. 华中电力,2010,23(3):1-5.
LIN Tao,LIU Shufen,LIU Lin,et al. A comparative study on two methods of power system low frequency oscillation waveform analysis[J]. Central China Electric Power,2010,23(3):1-5.
[14] 董明齐,杨东俊,黄涌,等. 华中电网 WAMS 实测区域低频振荡仿真[J]. 电网技术,2009,33(13):64-69.
DONG Mingqi,YANG Dongjun,HUANG Yong,et al. Simulation of regional low frequency oscillation based on data measured

by WAMS of Central China Power Grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 64-69.

[15] 周宏,李强,林涛,等. 特高压及 500 kV 区域联网的仿真复现与比较[J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 153-159.

ZHOU Hong, LI Qiang, LIN Tao, et al. Simulation recurrence and comparison between UHV interconnection and 500 kV interconnection of regional power grids[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 153-159.

[16] 李强,林涛,高玉喜,等. 区域电网联网试验暂态过程的仿真[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 85-90.

LI Qiang, LIN Tao, GAO Yuxi, et al. Simulation of transients in interconnection test of regional power grids[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 85-90.

作者简介:

徐遐龄(1980-),女,湖北鄂州人,工程师,博士,研究方向为电力系统运行与控制、新能源发电与智能电网;

林涛(1969-),男,浙江温州人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制、电力系统继电保护、新能源发电与智能电网、电能质量分析与控制(E-mail: tlin@whu.edu.cn);

高玉喜(1988-),男,安徽凤阳人,硕士,研究方向为电力系统运行与控制;

张帆(1987-),男,湖北孝感人,硕士,研究方向为电力系统运行与控制。

Warning of inter-area mode oscillation based on CBR and OAPID for interconnected power grids

XU Xialing¹, LIN Tao², GAO Yuxi², ZHANG Fan²

(1. Central China Electric Power Dispatching and Communication Center, Wuhan 430077, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A method of inter-area mode oscillation prediction based on CBR(Case-Based Reasoning) theory and OAPID(Oscillatory Active Power Increment Distribution) theory is proposed for interconnected power grids, which, based on the measurements of WAMS(Wide Area Measurement System), issues the warning of inter-area mode oscillation before low-frequency system oscillation occurs and provides the advice of system operating mode adjustment during system oscillation to improve system damping. Results of a test for a regional power grid according to its actual WAMS data demonstrate the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: electric power systems; stability; inter-area mode oscillation; case-based reasoning; OAPID; WAMS

(上接第 87 页 continued from page 87)

作者简介:

赵伟(1981-),男,山东泰安人,博士,主要从事电力系统谐波抑制和无功补偿技术与应用、电能质量问题对电能计量的影响等方面的研究;

王文(1987-),男,湖北天门人,博士研究生,主要从事电力系统谐波抑制和无功补偿以及电气节能技术等方面的研究(E-mail: wildwind6@126.com);

肖勇(1978-),男,山东靖州人,工程师,主要从事电能

计量、电能质量等方面的研究;

孟金岭(1986-),男,河南平顶山人,工程师,主要从事电力系统谐波抑制和无功补偿技术与应用、电磁计量技术等方面的研究;

李洲(1987-),男,湖南邵阳人,硕士,主要从事电能质量监控系统和混合有源电力滤波技术等方面的研究;

罗安(1957-),男,湖南长沙人,教授,博士研究生导师,主要从事有源滤波、无功补偿及控制理论和技术等方面的教学与研究工作。

Space vector current control of shunt active power filter

ZHAO Wei¹, WANG Wen², XIAO Yong¹, MENG Jinling¹, LI Zhou², LUO An²

(1. Electric Power Research Institute, Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: A current control method based on the theory of voltage space vector analysis is proposed for SAPF(Shunt Active Power Filter). The optimal tracking of reference current is introduced, which ensures the amplitude of error current vector swiftly approaching to zero within a switching period. With full consideration of the actual voltage output capability, the output voltage vector of inverter is accurately calculated and composed by outputting multiple basic voltage vectors within a switching period, which ensures the differential of error current vector has the best direction and the largest amplitude. Therefore, the reference current is thus quickly followed while the inverter is controllable and the rapidness and reliability of control system are enhanced. Experimental results show the validity of the proposed control method.

Key words: shunt active power filter; electric current control; space vector; vector composition