

基于 WAMS 的互联电网联络线定功率控制系统设计

李 强

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要:随着全国联网和电力市场的逐步推进,迫切要求对互联系统间的联络线输送功率进行有效控制。选择发电机输出功率转移分布因子法(GSDF)做控制算法,设计了基于 WAMS 平台的联络线定功率控制系统及其实现方案。采用功能划分、线程分解、并行处理、存储静态参数库等方法,使系统实时在线应用成为可能。算例研究表明,算法具有较高的精度,功率调整方便快捷,为在线监视、调整、控制联络线潮流提出了广阔的工程应用前景。

关键词: WAMS 互联系统;联络线控制;发电机输出功率转移分布因子法

Abstract: With the development of the nationwide power grid interconnection and power market, the effective control of inter-area tie-line power transmission is strongly demanded. Generation shifted distribution factor (GSDF) is selected as the control algorithm. The tie-line scheduled power control system and its implementation scheme are designed based on WAMS platform. The methods such as function division, thread decomposition, parallel processing and storage static parameter library are used to realize the real-time online application of the system. The examples indicate that it has a high accuracy and can be easily adjusted, which provides a bright future of online monitoring and controlling of tie-line power flow.

Key words: wide area measurement system (WAMS); interconnected system; tie-line control; generation shifted distribution factor (GSDF)

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2009)05-0062-05

0 引 言

随着“西电东送、全国联网、南北互供”战略的实施,电网互联正逐步进行。目前,除了大区内各省间电网与周边省互联外,大区电网之间也都通过交流或直流线路实现了互联,如华中与华北电网、川渝电网实现交流联网;通过直流与西北电网、华东电网进行了联网。电网互联主要效益之一是通过联络线进行区域间功率互换,优化资源配置,这就需要进行联络线定功率控制,维持联络线功率在给定值、避免非协议内功率在联络线流动。

此外,随着联网工程的实施,电力市场也被逐步提上日程,华东、华中、南方电网正模拟交易。电力市场环境下,各利益方都想通过联络线尽可能多的输送功率,由于联络线控制复杂,目前大区间的联络线交换功率一般都是定值,如西北电网通过灵宝直流送电华中 360 MW,华中电网通过三广直流送电南方电网 3 000 MW。如何在系统安全稳定运行的基础上,通过对联络线进行优化控制,提高输送功率,也是电力市场改革顺利进行的关键。

广域测量系统(wide area measurement system,以下简称 WAMS)是以 PMU 装置为基本组成元件构成的新一代全网监测系统,目前已被应用于系统分析多个领域,如低频振荡分析与控制^[1,2]、状态估计^[3]、广域保护^[4]、受扰轨迹预测^[5]、电压稳定性分析^[6]等多个领域,将 WAMS 系统引入联络线定功率控制的研究还鲜有所见,仅文献[7]做了基于 WAMS 的潮流转移识别算法。因此,进行了基于 WAMS 的联络线定功率控制研究。在介绍 GSDF 控制算法基础上,提出了基于 WAMS 的联络线定功率控制系统构建方案,并进行了算例测试,为在线监视和控制联络线有功潮流维持在恒定值提供了新思路。

1 发电机输出功率转移分布因子法

发电机输出功率转移分布因子(generate shifted distribution factor GSDF)^[8]的含义是当发电机节点 i 的有功功率改变单位值时,支路 k 的有功潮流变化量。因此可根据联络线功率给定值和实际值的差值,由 GSDF 反过来调整各发电机有功出力,达到联络线功率的控制。

若电网中联络线 l 的有功功率需要控制。调整前联络线 l 的有功潮流是 P_l , 调整后要控制到 P_l^* , 调整量是 ΔP_l , 则有

$$\Delta P_l = P_l^* - P_l \quad (1)$$

若原网络中有 r 个发电机节点有功输出功率可调, 这些节点的有功输出功率改变量是 ΔP_G 时可使支路 l 的有功潮流改变 ΔP_l 。则 ΔP_l 由式 (2) 计算。

$$\Delta P_l = G_{l-G} \Delta P_G \quad (2)$$

灵敏度系数矩阵 G_{l-G} 为

$$G_{l-G} = \frac{X_{l-G}}{x_l} = \frac{M_l^T X_G}{x_l} \quad (3)$$

式 (3) 中, G_{l-G} —— $1 \times r$ 维行向量, 它是 r 个发电机节点有功输出功率变化引起支路 l 有功潮流变化的灵敏度系数;

M_l —— 支路 l 的关联列矢量, n 维;

X_G —— $n \times r$ 阶矩阵, 由单位列矢量组成, 共 r 列, 每列对应一个发电机节点, 该列只在所对应的发电机节点位置处有一个非零元素 1, 其余都为 0;

X —— 直流潮流方程中矩阵 B_0 的逆矩阵, 而 B_0 是用 $1/x$ 为支路参数建立的 $n \times n$ 阶电纳矩阵;

在 G_{l-G} 和 ΔP_l 分别求得后, 理论上根据式 (2) 就可求出可调有功节点的 ΔP_G , 但可调发电机较多, 而被控联络线只有一条 (若联络线有多回, 可进行等效), 即只有一个方程, 但却有 r 个待求量, 数学上可以有无穷多组解, 可利用拉格朗日乘数法求得一组使控制量 (ΔP_G) 最小的解, 经数学推导后, 可得到满足控制量最小的一组解为

$$\Delta P_G = G_{l-G}^T (G_{l-G} G_{l-G}^T)^{-1} \Delta P_l \quad (4)$$

因此, 利用发电机输出功率转移分布因子法控制联络线潮流的步骤如下: ①在潮流迭代接近收敛时, 检查支路 l 的有功潮流, 如果该支路潮流没有达到给定的控制值, 则利用式 (1) 计算该支路潮流所需的调整量 ΔP_l ; ②计算 G_{l-G} 。用 $-B_0$ 的因子表对列矢量 M_l 前代回代一次, 然后在其中取出发电机节点所对应的元素即组成了 X_{l-G} , 然后由式 (3) 求得 G_{l-G} , 也可由式 (3) 直接求取; ③利用式 (4) 计算发电机输出功率的调整值 ΔP_G , 修正发电机节点的给定有功功率, 继续进行潮流迭代直到潮流计算收敛, 支路 l 的有功潮流达到控制值时为止。

与常规的联络线控制算法如逐次迭代修正^[9, 10]、改进的迭代修正算法^[9]相比, 采用发电机输出功率转移分布因子法 (GSDF) 控制联络线潮流到给定值,

原理简单, 且只需要本区域的网络参数和联络线计划值。此外, 可随时修改联络线给定值, 修改后, 只需经过简单的计算就可达到控制值, 而前两种常规算法, 若修改联络线计划值, 则还需修改边界条件, 增加迭代的次数, 为在线应用带来不利因素。可见, 若采用发电机输出功率转移分布因子法控制联络线有功潮流, 结合 WAMS 系统平台, 具有广阔的在线监视和控制联络线潮流的工程前景。

2 控制系统设计

WAMS 系统以 GPS 技术为基础, 利用计算机技术和现代高速数字化通信网络实现全网数据的同步采集、实时记录、远距离实时传递和对数据的实时分析处理, 从而达到对电网动态过程的在线监测。整个 WAMS 体系由 PMU 子站、调度中心站 (即主站)、电力通讯网组成, 其中的 PMU 子站由 GPS、测量、监控、通信 4 个主要功能模块组成, PMU 将不同厂站的数据精确同步的传送到主站, 从而在实时数据库中就能取得同一时标下的系统动态数据, 进而可供各种显示、分析模块实时使用。此外, 主站系统还按照一定的时间间隔, 将历史数据存入历史数据服务器保存, 可供后期离线分析。

因此, WAMS 系统为在线监视、控制联络线潮流提供了平台, 将在以上讨论的算法基础上, 构建基于 WAMS 的联络线定功率控制系统, 提出系统结构设计和实现方案, 并用算例进行测试。

2.1 系统结构设计

其设计思想是: 将整个系统进行功能分解和划分, 除了 WAMS 系统外, 还由三个模块构成: 有效数据预处理单元、GSDF 计算应用程序、参数数据库。将各模块进行线程分解, 组成并列式结构, 模块之间也进行有效地衔接和协调。整个系统的结构设计如图 1 所示。

2.2 各子系统功能介绍

2.2.1 WAMS 中心站和子站

由 PMU 子站、通信通道、调度中心站组成。子站主要经由通信信道上传各子站状态数据、监控数据到 WAMS 中心站; WAMS 中心站接受子站上传的数据, 并将其按照一定的时间间隔写入实时数据库或历史数据库, 以供实时或离线分析。同时接受计算应用程序计算的调整机组出力命令, 并将其下达给相关电厂

的机组执行。该部分由已建好的 WAMS 系统执行，只是加上相应的应用程序接口。

2.2.2 有效数据预处理

该模块是整个系统的基础部分，主要为应用程序提供机组投运、出力、备用，网络结构，传输极限等实时状态数据。该模块先从实时数据库读取数据，然后由启动单元判断联络线功率是否等于计划值，考虑到数据可能存在的一定波动和分散性，采用以下判据：

$$|P_{act} - P_{sch}| \leq C \quad (5)$$

P_{act} ——联络线支路实际功率值；

P_{sch} ——联络线计划给定值；

C——联络线考虑数据分散性允许的最大偏差。

效果的精确性和可靠性，需要设置数据过滤和处理单元，从而对信号做插值、低通滤波、去除直流分量、去冗余等处理。许多文献中的系统设计流程都是将该单元置于从数据库读取数据后等较前的环节。这里则做了改进，将其置后，还是为了快速获取有效数据、提高控制的实时性。因为 WAMS 中心站上传的数据包含电厂和变电站两大类，除包含有功、无功功率外，还有正序电压幅值、相角、机组电气内电势幅值、频率、频率变化率等信息。这些海量的数据量以每秒几十帧的频率上传到主站，若按照常规的先滤波再提取的做法，有些电气量不会被使用，却仍要进行数据过滤，大大耗费了 CPU 时间，影响了实时性。改进后，只需对特定类数据做滤波处理，提高了算法的实时性和效率。

2.2.3 参数数据库

建立参数数据库的目的是存储系统静态参数，便于实时、快速的修改网络结构、参数、运行方式。其实质还是基于并行式处理思想，因为对于一个确定的系统，其网络结构和参数在一段时间内（指系统未扩建）是固定的，仅运行方式改变才改变潮流，且在某基础典型运行方式（如丰大运行方式）下，改变运方只是少数机组、支路的改变，很容易修改。基于此思想，参数数据库的建立就为实时计算潮流提供了很大的便利。

系统的运方都是由某时段内的典型方式构成，如丰大、丰小、枯大、枯小、检修方式。参数数据库中存储的就是系统的这些基础典型方式，例如对于丰大方式，存储了网络结构、参数、无功补偿设备的投运及补偿容量、各机组的容量、出力、备用容量、大负荷等系统静态参数，在丰大基础方式下，运方的修改就非常方便，使实时计算潮流成为可能。

2.2.4 计算应用程序

该部分是整个系统的核心计算模块，需要和其它各模块有效的衔接和协调。其具体的实现流程如图 2 所示。如 2.2.3 所述，参数数据库建立后，结合 2.2.2 有效数据预处理模块提供的机组状态、出力、支路状态等实时数据，就可方便、快捷的修改系统的运行参数、网络结构；快速潮流计算主要是为了实时性，可采用直流潮流法、P-Q 分解法、等值网络法等算法^[11]，可结合实时性、计算精度具体选用；判别单元仍可采用 2.1.2 中的判据，只是将联络线实际值换成联络线潮流计算值即可，并根据相应的逻辑值执行相

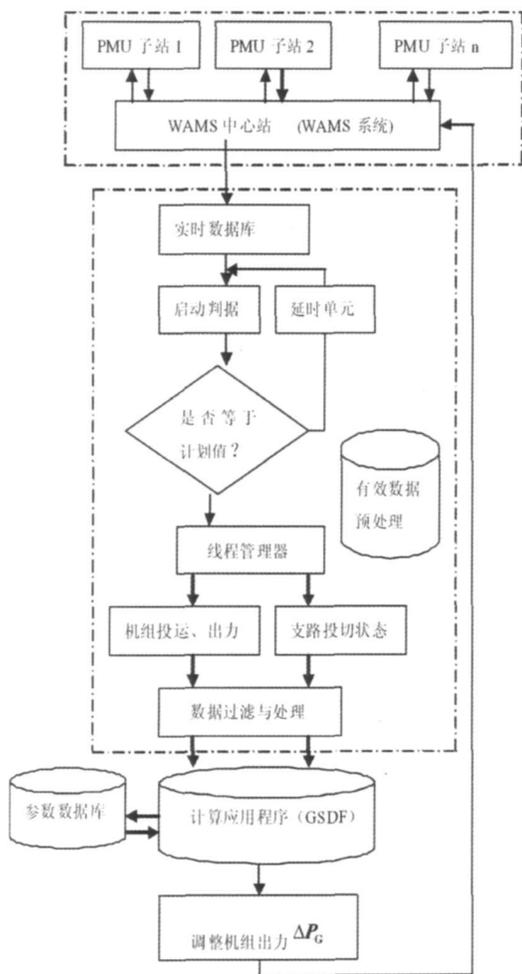


图 1 基于 WAMS 的联络线定功率控制系统结构设计

由以上判据执行相应的命令，延时单元根据系统设定的时间间隔读取联络线数据，循环执行，避免频繁调整。线程管理器利用线程分解和并行处理技术，快速、有效的提取计算应用程序所需的数据。在实际工程应用中，WAMS 系统可能出现数据帧丢失、信号包含高频杂散分量、冗余数据包，为提高定功率控制

表 1 联络线定功率控制方式下机组出力调整结果

区域	调整前					调整后				
	发电机	有功出力	联络线 实际值 P_{act}	联络线 偏差 ΔP_l	可调机组	调整量 ΔP_G	发电机	有功出力	联络线 实际值 P_{act}	联络线 偏差 ΔP_l
区域 1	G1	729.8	485.4	85.4	可调	16.1	G1	745.9	401.7	1.7
	G2	750			可调	-101	G2	649		
区域 2	G3	643	-480.9	80.9	可调	67	G3	710	-398.7	1.3
	G4	685			不可调		G4	695		

注:以上各功率单位均为 MW. 负值表示减出力, 增值表示增出力, 区域流出联络线功率为正, 流入为负, 联络线偏差取绝对值, 下同。

表 2 改变联络线计划值控制方式下机组出力调整结果

区域	协议功率 400 MW					协议功率 500 MW				
	发电机	有功出力	联络线 实际值 P_{act}	联络线 偏差 ΔP_l	可调机组	调整量 ΔP_G	发电机	有功出力	联络线 实际值 P_{act}	联络线 偏差 ΔP_l
区域 1	G1	745.9	401.7	1.7	可调	-28.5	G1	717.4	501.9	1.9
	G2	649			可调	130	G2	779		
区域 2	G3	710	-398.7	1.3	可调	58	G3	768	-497.1	2.9
	G4	695			不可调		G4	695		

应的程序; 该模块和其他模块联系紧密、互为依存, 需做好各模块间的信息交换和协调工作。

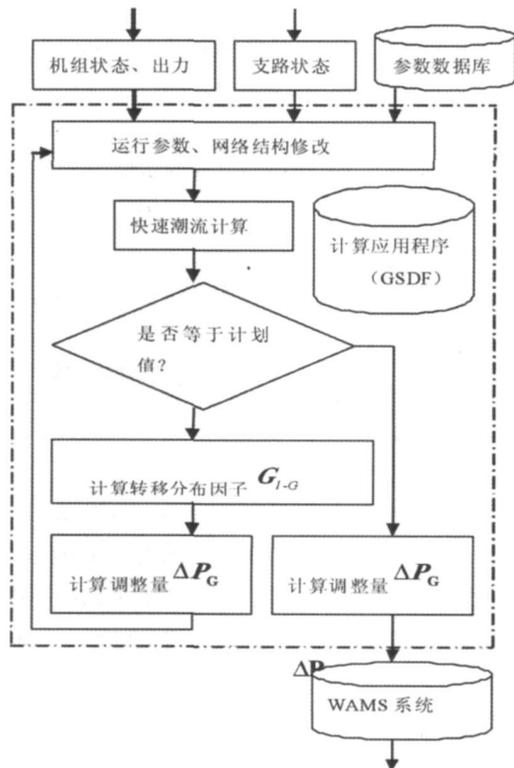


图 2 GSDF 法计算应用程序实现流程

3 算例研究

基于以上算法和设计, 则编写了核心计算程序, 并以四机两区域系统为算例, 以仿真数据代替 WAMS 采集数据作为数据源, 进行了算例研究, 系统接线图如图 3 所示, 系统参数见文献 [12]。

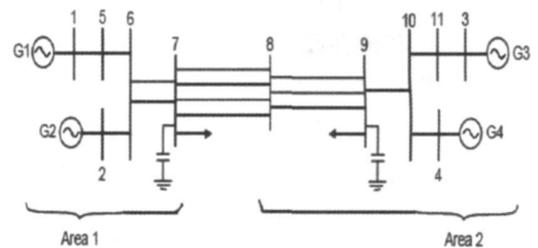


图 3 四机两区域系统接线图

母线 7 和 8 之间线路为联络线。对以下两种方式进行测试: 联络线定功率控制; 改变联络线计划值。

3.1 联络线定功率控制

电力市场构架下, 常需要区域间联络线传输功率维持为计划值, 以避免非协议内功率在联络线上流动, 符合交易双方的利益。为模拟这一场景, 设图 3 区域 1 计划由联络线向区域 2 输送功率 400 MW, 由于区域 2 出现扰动, 使联络线输送功率偏离计划值, 为保持联络线功率为给定值, 两区域分别进行调整, 程序计算结果如表 1 所示。

3.2 改变联络线计划值

设区域 2 的有功负荷增加 8%, 增加 140 MW, 改变联络线计划值到 500 MW, 即联络线在原协议基础上多输送 100 MW, 剩余不足由本区域机组增出力平衡。调整后各机组出力如表 2。

从以上两个工程情景的计算, 说明所提算法具有较高精度, 能充分利用系统备用容量, 区分可调节出力机组, 功率调整方便快捷, 具有良好的工程前景。

4 结束语

电网互联和电力市场改革迫切需要对联络线进

行实时、优化控制,将 WAMS 系统应用于互联电网联络线控制,以实时控制、在线应用为目标,提出了合理的系统构架方案,并在后期继续深化研究、协调,典型系统对核心计算程序测试表明,算法具有较高的精度、方便快捷、有工程应用前景,具有以下特点。

(1)与常规控制算法相比,采用 GSDF 法作为联络线控制算法,原理简单,只需要本区域的网络和运行参数,此外,可随时修改联络线计划值,程序编制简单,收敛速度快,与 WAMS 系统结合,可在线计算。

(2)对所构建的系统进行了合理的功能划分,将其分解为子模块,各模块之间既独立又相互协调,提高实时性。

(3)线程分解和并行处理设计、参数数据库的建立,大大缩短了数据在程序中的等待时间,从总体上提高了计算应用程序的性能,使在线计算成为可能。

(4)改进了其他在线算法将“数据过滤与处理单元”置前常规做法,将其置于较后环节,使其仅对有效数据进行过滤和处理,提高了算法的实时性和效率。

(5)由于 WAMS 系统投资大,因此仅在网络中中枢节点、重要电厂布置了 PMU,在这些有限的 PMU 节点情况下,其算法该如何改进和所构建的系统模块之间如何有效协调,是今后进一步研究的重点。

所提出的思想在工程中有一定的应用价值。

参考文献

[1] 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):1-2

[2] 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):1-5.

[3] 李大路,李蕊,孙元章,等.计及广域测量信息的状态估计错误参数识别与修正[J].电力系统自动化,2008,32(14):1-4.

[4] 薛禹胜,徐伟,等.关于广域测量系统及广域控制保护系统的评述[J].电力系统自动化,2007,31(15):1-5.

[5] 宋方方,毕天姝,杨奇逊.基于 WAMS 的电力系统受扰轨迹预测[J].电力系统自动化,2006,30(23):1-5.

[6] 刘道伟.基于广域测量系统(WAMS)的电压稳定在线监测[D].吉林:东北电力学院电力系统及其自动化系,2005.31-39.

[7] 徐慧明,毕天姝,黄少锋,等.基于 WAMS 的潮流转移识别算法[J].电力系统自动化,2006,30(14):1-5.

[8] 张伯明,陈寿孙.高等电力网络分析[M].北京:清华大学出版社,1996.204,216-219.

[9] 王祖佑.电力系统稳态运行计算机分析[M].北京:水利电力出版社,1987.58-60.

[10] 胡学浩,李汉香.潮流计算中区域联络线功率控制的模拟计算方法初探[J].电网技术,1989,(4):1-2.

[11] 孙莹,王葵.电力系统自动化[M].北京:中国电力出版社,2004.165-166.

[12] Prabha Kunder Power System Stability and Control[M]. McGraw-Hill Companies Inc 1994.525-529.

作者简介:

李强(1984-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制。

(收稿日期:2009-05-12)

(上接第 41 页)

表 1 更换绝缘子前后线路的防雷水平

击距 /m	线路防雷水平 /kA	
	S-210/Z	S-280/Z
30	27	36
50	44	59
70	62	83

6.3.2 11号杆更换为 12 m 杆

将原 15 m 的 11 号杆更换为 12 m 杆,更换前后线路的耐雷水平如表 2 所示。可见,更换以后,无论何种击距,11 号杆处防雷水平均可提高 15%。

表 2 11号杆高度更换前后防雷水平的变化

击距 /m	防雷水平 /kA	
	杆高 15 m	杆高 12 m
30	23	27
50	38	44
70	54	62

6.3.3 安装线路避雷器

东城线避雷器安装数量很少,每相隔 15~17 基安装一组 MOA,不能很好地对线路起到防雷保护作用。建议在原有安装避雷器的基础上,在特别高的杆塔 11 号杆、带拉线的杆塔 16 号杆及终端杆处各安装一组 MOA,在其余线路每隔 6~7 基杆增加一组线路避雷器,以提高该线路的防雷水平。

参考文献

[1] 曾海涛,郇嘉嘉,黄少先.高压配电网 10 kV 大企线路的防雷[J].机电工程技术,2008,37(6):110-112.

[2] 陈中明,郑楚韬.配电网架空线路感应雷过电压产生机理与防护[J].广东电力,2008,21(5):19-22.

[3] 赵莲清,李月乔,刘向军.传输线路感应雷防护计算方法的研究[J].现代电力,2004,21(6):51-55.

(收稿日期:2009-06-10)