



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111293686 A  
(43)申请公布日 2020.06.16

(21)申请号 202010132208.4

(22)申请日 2020.02.29

(71)申请人 上海电力大学

地址 200090 上海市杨浦区平凉路2103号

(72)发明人 徐波 章林炜 边晓燕 李东东

(74)专利代理机构 上海科盛知识产权代理有限公司 31225

代理人 丁云

(51)Int.Cl.

H02J 3/00(2006.01)

H02J 3/24(2006.01)

H02J 3/38(2006.01)

G06F 30/20(2020.01)

G06F 113/04(2020.01)

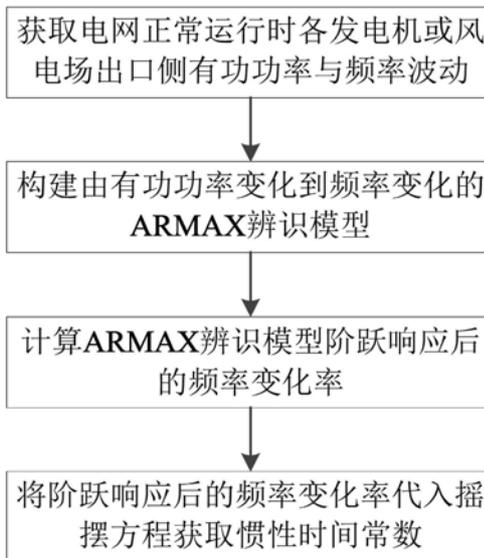
权利要求书1页 说明书6页 附图2页

(54)发明名称

基于ARMAX系统辨识的电力系统惯量实时评估方法

(57)摘要

本发明涉及一种基于ARMAX系统辨识的电力系统惯量实时评估方法,该方法基于如下步骤:(1)获取电网正常运行时各发电机和风电场出口侧有功功率与频率波动;(2)将有功功率变化作为输入,频率变化作为输出,构建由有功功率变化到频率变化的ARMAX辨识模型;(3)计算ARMAX辨识模型阶跃响应后的频率变化率;(4)将阶跃响应后的频率变化率代入摇摆方程获取惯性时间常数。与现有技术相比,本发明不仅能够精确反映电力系统不同运行状态下惯量的动态变化,为电网稳定运行以及新能源并网提供辅助决策,而且还可以根据实测数据实时更新评估结果,有助于了解电力系统潜在的不稳定风险和发生意外事故后保持稳定运行的能力。



1. 一种基于ARMAX系统辨识的电力系统惯量实时评估方法,其特征在于,该方法基于如下步骤:

(1) 获取电网正常运行时各发电机和风电场出口侧有功功率与频率波动;

(2) 将有功功率变化作为输入,频率变化作为输出,使用ARMAX系统辨识技术构建由有功功率变化到频率变化的ARMAX辨识模型;

(3) 计算ARMAX辨识模型阶跃响应后的频率变化率;

(4) 将阶跃响应后的频率变化率代入摇摆方程获取惯性时间常数。

2. 根据权利要求1所述的一种基于ARMAX系统辨识的电力系统惯量实时评估方法,其特征在于,步骤(2)构建不同阶次的ARMAX辨识模型,进而步骤(3)分别计算不同阶次的ARMAX辨识模型阶跃响应后的频率变化率,步骤(4)获取对应的惯性时间常数,最后将惯性时间常数取平均作为该发电机或风电场的惯性时间常数评估值。

3. 根据权利要求2所述的一种基于ARMAX系统辨识的电力系统惯量实时评估方法,其特征在于,步骤(3)中频率变化率为:ARMAX辨识模型的阶跃响应后频率变化率曲线首先经低通滤波,然后求取低通滤波后的频率变化率曲线0.2s内的平均值。

4. 根据权利要求1所述的一种基于ARMAX系统辨识的电力系统惯量实时评估方法,其特征在于,所述的摇摆方程为:

$$\frac{2HS_N}{f_s} \cdot \frac{df(t)}{dt} = P_m(t) - P_e(t) = \Delta P(t)$$

其中,H为待求取的惯性时间常数,单位为s, $f_s$ 为系统额定频率,单位为Hz; $S_N$ 为发电机或风电场额定容量,单位MVA, $df(t)/dt$ 是t时刻频率变化率,单位为Hz/s, $P_m(t)$ 和 $P_e(t)$ 分别是机械功率和电磁功率,单位为MW, $\Delta P(t)$ 为有功功率变化,单位为MW。

5. 根据权利要求1所述的一种基于ARMAX系统辨识的电力系统惯量实时评估方法,其特征在于,步骤(1)有功功率与频率波动通过电力系统同步相量测量装置获取。

6. 根据权利要求1所述的一种基于ARMAX系统辨识的电力系统惯量实时评估方法,其特征在于,ARMAX辨识模型为:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t-n_k) + C(q)e(t),$$

其中, $A(q)$ 、 $B(q)$ 、 $C(q)$ 分别为关于q的 $n_a$ 、 $n_b$ 、 $n_c$ 次多项式, $u(t-n_k)$ 为辨识模型的输入, $y(t)$ 为辨识模型的输出, $e(t)$ 为噪声, $n_k$ 为输入和输出延迟, $n_a = n_b = n_c = n$ , $n$ 为常数, $n_k = 0$ 。

## 基于ARMAX系统辨识的电力系统惯量实时评估方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种电力系统惯量实时评估方法,尤其是涉及一种基于ARMAX系统辨识的电力系统惯量实时评估方法。

### 背景技术

[0002] 惯性是电力系统的固有属性,表现为系统对扰动引起频率波动的阻抗作用,是系统安全稳定运行的基础保障。惯量是衡量电力系统由于惯性,在受到扰动后吸收或注入有功功率能力的参数。电力系统稳定运行时,系统频率需要维持在一定的范围内。当系统受到一定大小的扰动后,系统频率变化受系统惯性时间常数 $H$ 的影响, $H$ 越大,系统频率变化率越小,系统频率下降得越慢,为一次调频争取更多时间,系统抗扰动能力越强。因此, $H$ 是表征系统惯量大小,体现系统稳定性的重要参数。

[0003] 大多数惯量在传统意义上是由同步发电机的物理旋转质量所提供的,然而传统能源的日益匮乏促使各国加快了新能源的开发,其中风电、光伏的大量接入取代了电力系统中部分同步发电机。风电渗透率的不断提高使电网频率稳定受到极大威胁。由于风力发电机大多通过电力电子设备接入电网,发电侧与电网解耦,无法响应电网频率变化,这使得系统惯性时间常数减小,系统稳定性受到威胁。

[0004] 针对大规模风电并网给传统电网造成的惯性缺失问题,在风机并网变换器上加入虚拟惯量控制,使风机在电网频率发生变化时改变自身输出功率,对外表现出等效惯量,是一种有效的解决方案。考虑到风力发电的随机性和时变性,可以根据风电场各风机工况状态改变其虚拟惯量。现有惯性估计方法的研究集中在电网中同步机的惯量在线评估,忽略了对风机虚拟惯量控制实际效果的综合评测,缺乏对其控制性能所表现出的有效惯量进行实时评估,难以实时量化对电网的支撑作用。在辅助服务市场中,电网公司更无法根据风电场所提供的调频辅助服务的强弱,给予经济激励。因此在线评估风电场和整个电力系统的惯量具有重要的现实意义和应用价值。然而,风电场实际输出的惯性,可能与控制器中的参数设置并不一致。因此,如何根据电网的实际运行数据,实时识别出其惯性大小显得非常关键。准确测量系统惯性时间常数有助于反映电力系统不同运行状态下惯量的动态变化,为电网稳定运行以及新能源并网提供辅助决策,而且还可以根据实测数据在线更新评估结果,提高对电网稳定性及抗扰动能力判断的准确性和时效性。

[0005] 传统惯量评估方法一般采用发电机摇摆方程计算惯量时间常数 $H$ 。虽然传统的基于大扰动的惯量在线评估方法准确性较高,但需要电网中大扰动的激励,如线路短路,发电机组退出运行等,不利于电网的稳定运行,不能实现惯量的实时评估,适用性较低。

[0006] 基于系统辨识的惯量评估方法利用电网正常运行时的有功功率与频率波动,使用ARMAX系统辨识方法,建立由发电机有功功率变化到频率变化量的动态模型,从所识别的辨识模型中获取惯性时间常数 $H$ 。与传统惯量评估方法相比,该方法只需利用电力系统正常运行时的实测数据就可进行惯量评估,不需要大扰动的激励,可以在线评估电力系统惯量。传统评估方法需要确定扰动发生时刻,并且在调频过程中无法区分惯量响应与一次调频响

应,而该方法在电力系统正常运行时进行惯量评估,一次调频不参与调频过程,由此可以避免一次调频对惯量评估的影响,从而提高惯量评估准确性。

[0007] 使用系统辨识进行惯量在线评估必须对辨识模型指定特定的阶次,尽管已经进行了很多关于辨识模型阶次选择的研究,但还是很难选择一个固定的模型阶次。同步发电机中包含许多复杂的调频控制系统,无法为发电机调频模型确定特定的阶次,并且所适用的模型阶次可能会随着系统运行状态的不同发生改变。因此目前基于系统辨识在线评估惯量的方法是选择合适阶次范围,对该范围内每一阶次辨识模型求取惯性时间常数再求平均值。该阶次范围必须足够大以捕获发电机调频主要动态,但仍应足够小,以免变得过于复杂使得计算量过大。不同阶次的ARMAX辨识模型的评估结果偏差十分大,使得惯量在线评估结果与真实值误差较大。因此,对于常规使用零时刻脉冲响应值来确定惯性时间常数的方法,ARMAX辨识模型的阶次对惯量评估准确度的影响很大。

## 发明内容

[0008] 本发明的目的就是为了解决上述现有技术存在的缺陷而提供一种基于ARMAX系统辨识的电力系统惯量实时评估方法。

[0009] 本发明的目的可以通过以下技术方案来实现:

[0010] 一种基于ARMAX系统辨识的电力系统惯量实时评估方法,该方法基于如下步骤:

[0011] (1) 获取电网正常运行时各发电机和风电场出口侧有功功率与频率波动;

[0012] (2) 将有功功率变化作为输入,频率变化作为输出,使用ARMAX系统辨识技术构建由有功功率变化到频率变化的ARMAX辨识模型;

[0013] (3) 计算ARMAX辨识模型阶跃响应后的频率变化率;

[0014] (4) 将阶跃响应后的频率变化率代入摇摆方程获取惯性时间常数。

[0015] 步骤(2) 构建不同阶次的ARMAX辨识模型,进而步骤(3) 分别计算不同阶次的ARMAX辨识模型阶跃响应后的频率变化率,步骤(4) 获取对应的惯性时间常数,最后将惯性时间常数取平均作为该发电机或风电场的惯性时间常数评估值。

[0016] 步骤(3) 中频率变化率为:ARMAX辨识模型的阶跃响应后频率变化率曲线首先经低通滤波,然后求取低通滤波后的频率变化率曲线0.2s内的平均值。

[0017] 所述的摇摆方程为:

$$[0018] \quad \frac{2HS_N}{f_s} \cdot \frac{df(t)}{dt} = P_m(t) - P_e(t) = \Delta P(t)$$

[0019] 其中,H为待求取的惯性时间常数,单位为s, $f_s$ 为系统额定频率,单位为Hz; $S_N$ 为发电机或风电场额定容量,单位MVA, $df(t)/dt$ 是t时刻频率变化率,单位为Hz/s, $P_m(t)$ 和 $P_e(t)$ 分别是机械功率和电磁功率,单位为MW, $\Delta P(t)$ 为有功功率变化,单位为MW。

[0020] 步骤(1) 有功功率与频率波动通过电力系统同步相量测量装置获取。

[0021] ARMAX辨识模型为:

$$[0022] \quad A(q)y(t) = B(q)u(t-n_k) + C(q)e(t),$$

[0023] 其中, $A(q)$ 、 $B(q)$ 、 $C(q)$ 分别为关于q的 $n_a$ 、 $n_b$ 、 $n_c$ 次多项式, $u(t-n_k)$ 为辨识模型的输入, $y(t)$ 为辨识模型的输出, $e(t)$ 为噪声, $n_k$ 为输入和输出延迟, $n_a = n_b = n_c = n$ ,n为常数, $n_k = 0$ 。

[0024] 与现有技术相比,本发明具有如下优点:

[0025] (1) 本发明通过ARMAX辨识模型的阶跃响应进行惯量实时评估,减小由辨识模型阶次造成的误差,提高电力系统惯量实时评估的精确程度;

[0026] (2) 本发明首先将ROCOF曲线进行低通滤波,然后取阶跃响应0.2s内频率变化率的平均值作为计算惯性时间常数的频率变化率,减小了部分阶次的辨识模型阶跃响应后的初始阶段频率的波动,进而提高惯量实时评估的准确性;

[0027] (3) 本发明不仅能够精确反映电力系统不同运行状态下惯量的动态变化,为电网稳定运行以及新能源并网提供辅助决策,而且还可以根据实测数据在线更新评估结果,有助于了解电力系统潜在的不稳定风险和发生意外事故后保持稳定运行的能力。

## 附图说明

[0028] 图1为本发明基于ARMAX系统辨识的电力系统惯量实时评估方法的流程框图;

[0029] 图2为本发明实施例中的仿真系统的结构示意图;

[0030] 图3为本发明实施例中传统脉冲响应法和本发明阶跃响应法下风电场惯量评估误差的对比图;

[0031] 图4为本发明实施例中传统脉冲响应法和本发明阶跃响应法下发电机G2惯量评估误差的对比图。

## 具体实施方式

[0032] 下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明。注意,以下的实施方式的说明只是实质上的例示,本发明并不意在对其适用物或其用途进行限定,且本发明并不限定于以下的实施方式。

[0033] 实施例

[0034] 如图1所示,一种基于ARMAX系统辨识的电力系统惯量实时评估方法,该方法基于如下步骤:

[0035] (1) 获取电网正常运行时各发电机或风电场出口侧有功功率与频率波动;

[0036] (2) 将有功功率变化作为输入,频率变化作为输出,使用ARMAX系统辨识技术构建由有功功率变化到频率变化的ARMAX辨识模型;

[0037] (3) 计算ARMAX辨识模型阶跃响应后的频率变化率;

[0038] (4) 将阶跃响应后的频率变化率代入摇摆方程获取惯性时间常数。

[0039] 步骤(2) 构建不同阶次的ARMAX辨识模型,进而步骤(3) 分别计算不同阶次的ARMAX辨识模型阶跃响应后的频率变化率,步骤(4) 获取对应的惯性时间常数,最后将惯性时间常数取平均作为该发电机或风电场的惯性时间常数评估值。更为具体地,步骤(3) 中频率变化率为:ARMAX辨识模型的阶跃响应后频率变化率曲线首先经低通滤波,然后求取低通滤波后的频率变化率曲线0.2s内的平均值。

[0040] ARMAX辨识模型的阶跃响应能够清楚地表现出随着输入(发电机有功功率)的阶跃变化,输出(发电机频率偏差)的响应情况。当给ARMAX辨识模型一个阶跃输入,即发电机有功输出产生突变,发电机转子由于电磁功率和机械功率之间的不平衡而加速或减速,对外表现出频率波动,该过程可以由摇摆方程进行描述,而在有功功率变化量 $\Delta P$ 和频率变化量

$\Delta f$ 之间建立的ARMAX辨识模型与摇摆方程相关。因此可以通过辨识模型阶跃响应后的输出,即频率变化值,计算频率变化率(ROCOF)。虽然在阶跃响应后不同阶次的辨识模型频率出现不同的偏差,但其频率变化率ROCOF在阶跃响应后短时间内基本相等。由于部分阶次的辨识模型阶跃响应后的初始阶段频率存在波动,因此,先将求得的ROCOF曲线进行低通滤波,取阶跃响应后0.2s内频率变化率的平均值作为步骤(4)中频率变化率,从而提高惯量实时评估的准确性。

[0041] 所述的摇摆方程为:

$$[0042] \quad \frac{2HS_N}{f_s} \cdot \frac{df(t)}{dt} = P_m(t) - P_e(t) = \Delta P(t)$$

[0043] 其中,H为待求取的惯性时间常数,单位为s, $f_s$ 为系统额定频率,单位为Hz; $S_N$ 为发电机或风电场额定容量,单位MVA, $df(t)/dt$ 是t时刻频率变化率,单位为Hz/s, $P_m(t)$ 和 $P_e(t)$ 分别是机械功率和电磁功率,单位为MW, $\Delta P(t)$ 为有功功率变化,单位为MW。

[0044] 步骤(1)有功功率与频率波动通过电力系统同步相量测量装置获取。

[0045] 将发电机频率控制过程近似为线性控制系统。考虑单台发电机,在发电机机械功率 $P_m$ 保持不变的时间段内,将发电机的有功功率输出变化量 $\Delta P$ (电磁功率变化 $\Delta P_e$ )作为输入,相应时刻的发电机频率偏差 $\Delta f$ 作为输出。确定系统的输入和输出之后,将系统辨识方法应用于输入与输出数据。可通过比较拟合百分比来选取模型结构,使用最佳拟合模型用于惯性的提取。

[0046] ARMAX辨识模型为:

$$[0047] \quad A(q)y(t) = B(q)u(t-n_k) + C(q)e(t),$$

[0048] 其中, $A(q)$ 、 $B(q)$ 、 $C(q)$ 分别为关于q的 $n_a$ 、 $n_b$ 、 $n_c$ 次多项式, $u(t-n_k)$ 为辨识模型的输入, $y(t)$ 为辨识模型的输出, $e(t)$ 为噪声, $n_k$ 为输入和输出延迟, $n_a = n_b = n_c = n$ , $n$ 为常数, $n_k = 0$ 。

[0049] 本实施例对图2所示的仿真系统进行仿真验证。为了实现本文使用的辨识方法,假定电力系统中有足够数量的PMU,测得足够的测量数据,则可以由输入和相应输出数据使用系统辨识方法识别出辨识模型。从辨识模型中获取系统中相应的发电机和风电场的惯性时间常数H。

[0050] 在电力系统正常运行时,利用PMU测量风电场及各同步发电机的有功功率和频率波动,取其中60s的有功功率变化 $\Delta P$ 作为输入,频率变化 $\Delta f$ 作为输出,使用ARMAX系统辨识方法对每个数据集以 $n = n_{min}, \dots, n_{max}$ 阶数范围内的模型进行拟合。为简化评估过程,在每个迭代阶次内,定义模型各种变量的阶次相等,即 $n_a = n_b = n_c = n$ ,输入-输出延迟为零,即 $n_k = 0$ 。

[0051] 由于辨识得到的ARMAX多项式模型是离散时间(即Z域)线性系统,首先使用MATLAB中的d2c函数将离散时间ARMAX模型转换为连续时间模型,并通过s域准则(极点的实数部分应小于零)检查所生成模型的稳定性。再给各阶ARMAX连续时间辨识模型一个单位阶跃输入,计算频率变化率,得到ROCOF曲线,将ROCOF曲线进行低通滤波,计算阶跃响应后0.2s内频率变化率平均值,将该值代入式摇摆方程,式中 $\Delta P(t) = 1$ ,通过摇摆方程计算惯性时间常数。对图2所示的仿真系统采用上述方法进行惯量评估。

[0052] 风电场惯量评估结果如表1所示,图3为传统脉冲响应法和本发明阶跃响应法下风

电场惯量评估误差的对比图。

[0053] 表1风电场惯量评估结果

模型阶次	脉冲响应方法		阶跃响应方法	
	辨识结果	误差	辨识结果	误差
2	7.103	-28.97%	9.921	0.79%
3	8.947	-10.53%	6.086	-39.14%
4	8.419	-15.81%	6.954	-30.46%
5	8.483	-15.17%	13.344	33.44%
6	9.648	-3.52%	10.776	7.76%
7	6.778	-32.22%	17.543	75.43%
8	6.790	-32.10%	9.257	-7.43%
9	4.611	-53.89%	9.684	-3.16%
10	7.117	-28.83%	9.999	-0.01%
11	4.574	-54.26%	9.589	-4.11%
平均	7.247	-27.53%	10.315	3.15%

[0056] 发电机G2惯量评估结果如表2所示,图4为传统脉冲响应法和本发明阶跃响应法下发电机G2惯量评估误差的对比图。

[0057] 表2发电机G2惯量评估结果

模型阶次	脉冲响应方法		阶跃响应方法	
	辨识结果	误差	辨识结果	误差
2	3.156	5.21%	3.981	32.7%
3	3.516	17.20%	3.125	4.17%
4	1.537	-48.76%	3.092	3.07%
5	1.427	-52.44%	2.555	-14.83%
6	3.091	3.05%	2.159	-28.03%
7	2.403	-19.88%	3.967	32.23%
8	1.210	-59.68%	2.506	-16.47%
9	1.035	-65.50%	3.336	11.2%
10	1.117	-62.78%	2.771	-7.63%
11	1.612	-46.27%	2.912	-2.93%
平均	2.010	-33%	3.04	1.347%

[0059] 采用本发明方法得到整个系统的惯量评估结果如表3所示。

[0060] 表3系统阶跃响应法惯量评估结果

发电机	惯性时间常数 (s)	额定功率 (MW)	Hi·Si
风电场	10.315	526.667	5432.57
G2	3.040	400	1216
G3	5.146	400	2058.4
G4	7.882	400	3152.8
总计		1726.667	11859.93
系统等效惯性时间常数		6.869s	
误差		1.658%	

[0062] 上述实施方式仅为例举,不表示对本发明范围的限定。这些实施方式还能以其它各种方式来实施,且能在不脱离本发明技术思想的范围内作各种省略、置换、变更。

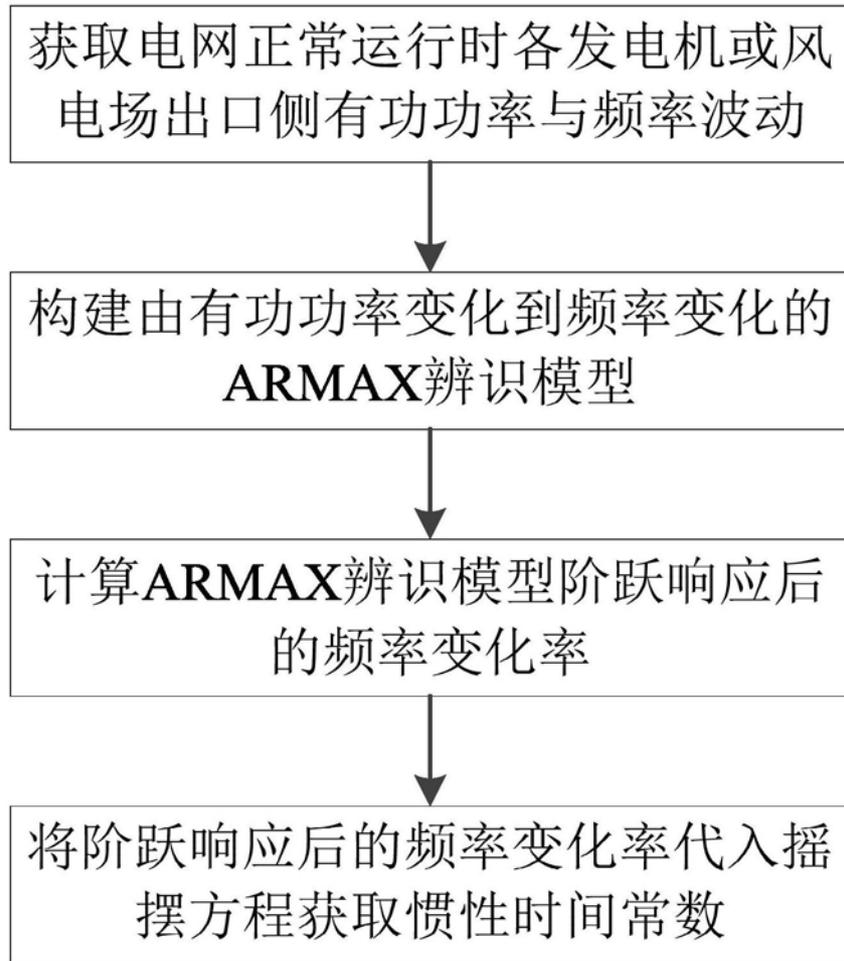


图1

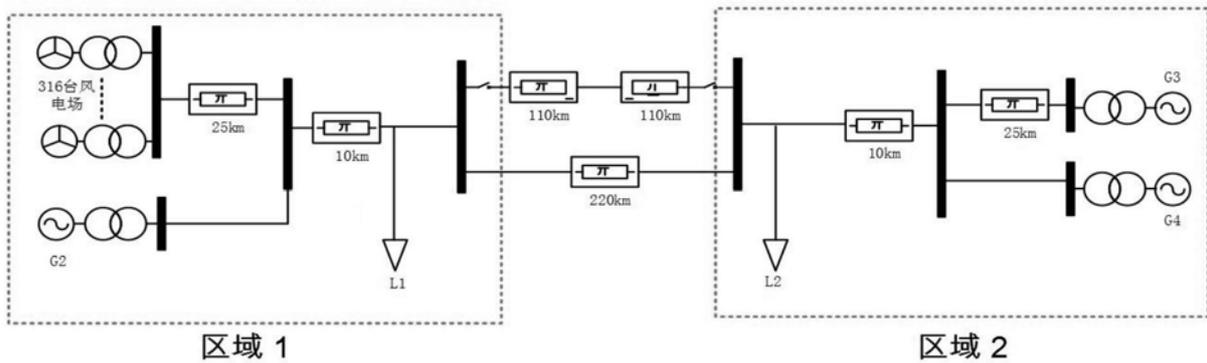


图2

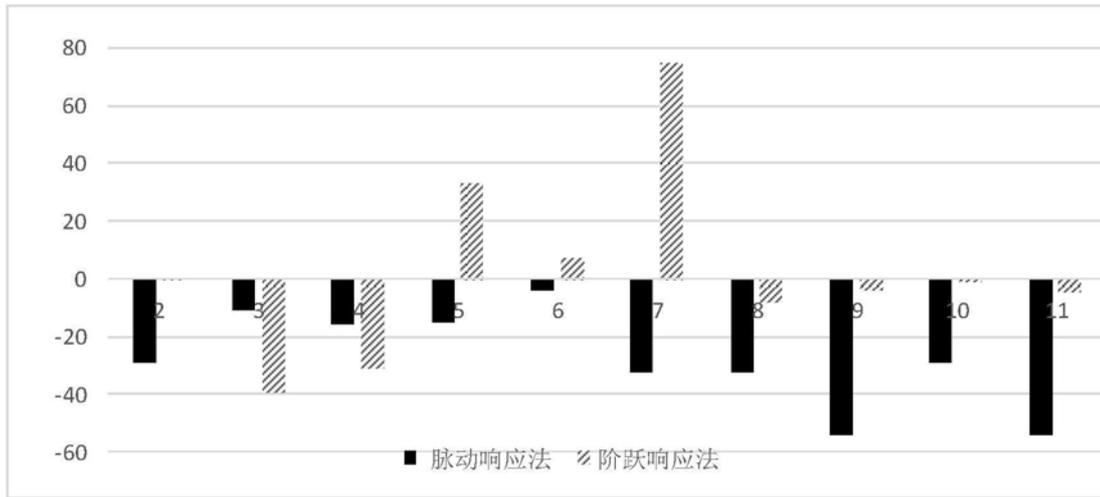


图3

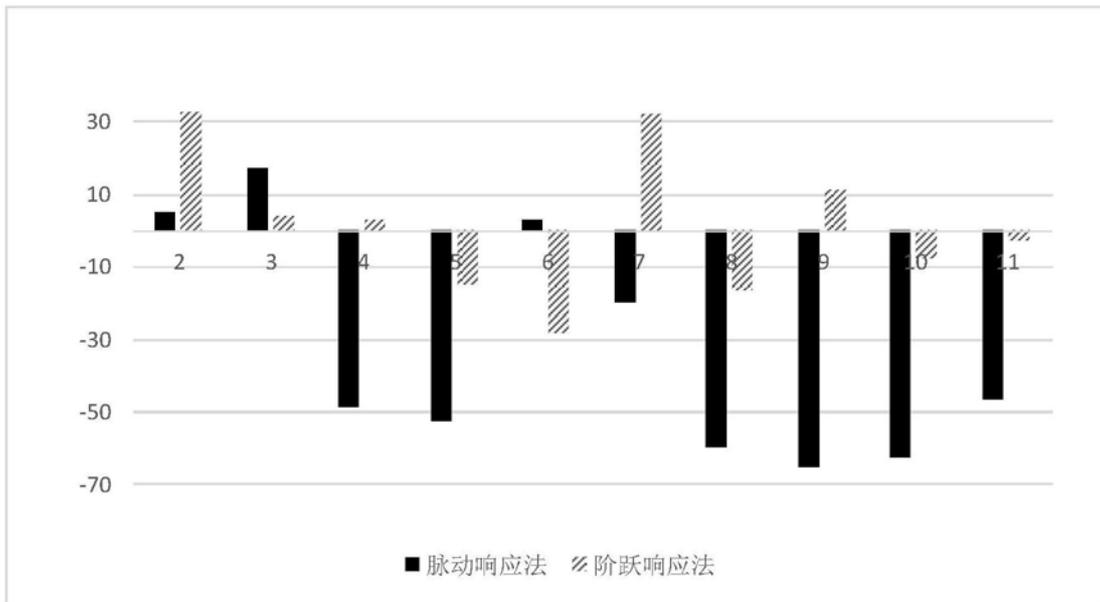


图4