



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109149566 A
(43)申请公布日 2019.01.04

(21)申请号 201811036037.4

(22)申请日 2018.09.06

(71)申请人 大连理工大学

地址 116024 辽宁省大连市甘井子区凌工
路2号

(72)发明人 李卫东 刘柳

(74)专利代理机构 大连理工大学专利中心
21200

代理人 李晓亮 潘迅

(51)Int.Cl.

H02J 3/00(2006.01)

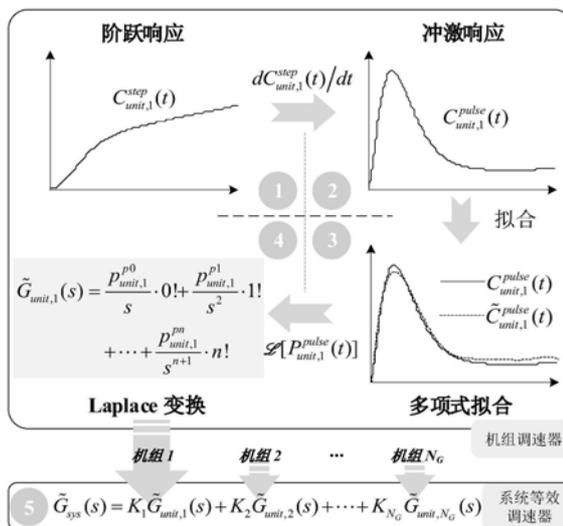
权利要求书2页 说明书4页 附图1页

(54)发明名称

一种大功率缺失下频率最低点预测的仿真模型的建模方法

(57)摘要

一种大功率缺失下频率最低点预测的仿真模型的建模方法属于电力系统分析领域,包括以下步骤:S1:对各机组调速器阶跃响应曲线进行离散微分运算得到其冲激响应曲线;S2:利用多项式对冲激响应曲线进行拟合;S3:利用最小二乘法确定多项式拟合系数;S4:对步骤S2所得多项式进行Laplace变换,求解调速器的近似传递函数;S5:计算系统等效调速器的传递函数;S6:基于步骤S5所得的系统等效调速器传递函数,建立大功率缺失下频率最低点预测的仿真模型。本发明基于各调速器阶跃响应曲线,利用所提技术方案,可建立大功率缺失下频率最低点预测的仿真模型,从而准确快速计算大功率缺失下的最大频率偏移和频率最低点时间。



1. 一种大功率缺失下频率最低点预测的仿真模型的建模方法,其特征在于以下步骤:

S1: 建立各机组调速器的传递函数,模拟各机组的频率响应动态过程;收集各机组的调门扰动试验曲线,即调速器的阶跃响应曲线,对各机组调速器阶跃响应曲线 $C_{unit,i}^{step}(t)$ 进行离散微分运算得到其冲激响应曲线 $C_{unit,i}^{pulse}(t)$;其中, t 为响应时间, i 为机组编号;

S2: 利用 n 次多项式 $\tilde{C}_{unit,i}^{pulse}(t)$ 对冲激响应曲线 $C_{unit,i}^{pulse}(t)$ 在 $t \in [0, t_{fit}]$ 内进行拟合,获取各机组调速器冲激响应的时域解析表达式;

所述的 n 次多项式 $\tilde{C}_{unit,i}^{pulse}(t)$ 如公式 (1) 所示:

$$\tilde{C}_{unit,i}^{pulse}(t) = p_{unit,i}^{p0} + p_{unit,i}^{p1}t + \cdots + p_{unit,i}^{pn}t^n \quad t \in [0, t_{fit}] \quad (1)$$

式中: $\mathbf{p}_{unit,i}^{pulse} = [p_{unit,i}^{p0}, p_{unit,i}^{p1}, \cdots, p_{unit,i}^{pn}]^T$ 为多项式拟合系数向量, t_{fit} 为时域拟合时长, n 为拟合阶数;

S3: 定义拟合误差 $S_{unit,i}^{pulse}$, 求解各机组调速器冲激响应曲线的多项式拟合参数,并计算冲激响应曲线中各采样点的均方误差;通过最小二乘法最小化累积拟合误差,求解多项式拟合系数 $\mathbf{p}_{unit,i}^{pulse} = [p_{unit,i}^{p0}, p_{unit,i}^{p1}, \cdots, p_{unit,i}^{pn}]^T$;

所述的拟合误差 $S_{unit,i}^{pulse}$ 如公式 (2) 所示:

$$S_{unit,i}^{pulse} = \min \sum_{k=1}^m \left[\tilde{C}_{unit,i}^{pulse}(t_k) - C_{unit,i}^{pulse}(t_k) \right]^2 \quad t_k \in [0, t_{fit}] \quad (2)$$

式中: m 为时域拟合区间内的样本数量, k 为样本数据编号, t_k 为采样时间;

S4: 对步骤 S2 所得 n 次多项式 $\tilde{C}_{unit,i}^{pulse}(t)$ 进行 Laplace 变换,求解调速器 i 的近似传递函数 $\tilde{G}_{unit,i}(s)$ 为:

$$\tilde{G}_{unit,i}(s) = \mathcal{L} \left[\tilde{C}_{unit,i}^{pulse}(t) \right] = \sum_{l=0}^n \frac{p_{unit,i}^{pl}}{s^{l+1}} \cdot l! \quad (3)$$

式中: s 为复频域算子, l 为拟合阶数编号, p 为多项式拟合系数;

S5: 大功率缺失故障发生后,所有机组共同参与频率响应过程,其复频域内等效的调速器模型是前述各机组调速器模型的叠加,包含 N_G 台机组的系统等效调速器传递函数为:

$$\tilde{G}_{sys}(s) = \sum_{i=1}^{N_G} K_i \tilde{G}_{unit,i}(s) = \mathbf{s}^T \Gamma \mathbf{p}_{sys}^{pulse} \quad (4)$$

其中:

$$\mathbf{s} = \left[\frac{1}{s}, \frac{1}{s^2}, \cdots, \frac{1}{s^{n+1}} \right]^T \quad (5)$$

$$\Gamma = \text{diag} \{0!, 1!, \cdots, n!\} \quad (6)$$

$$\mathbf{p}_{sys}^{pulse} = \sum_{i=1}^{N_G} K_i \mathbf{p}_{unit,i}^{pulse} \quad (7)$$

式中： K_i 为标么值转换系数，即从机组容量标么值转化为系统容量标么值； N_G 为系统内频率响应机组的数量， $\mathbf{p}_{unit,i}^{pulse}$ 为机组调速器 i 冲激响应的多项式拟合系数向量； \mathbf{p}_{sys}^{pulse} 为系统等效调速器冲激响应的多项式拟合系数向量；

S6：忽略系统网络结构的影响，保留各机组调速器动态，基于系统等效惯性和步骤S5所得的系统等效调速器传递函数建立大功率缺失下频率最低点预测的仿真模型。

一种大功率缺失下频率最低点预测的仿真模型的建模方法

技术领域

[0001] 本发明属于电力系统分析领域,涉及一种大功率缺失下频率最低点预测的仿真模型的建模方法。

背景技术

[0002] 随着高比例可再生能源的接入,风力、光伏等新能源机组将逐步成为电力系统的主力电源。相比传统发电机组,新能源机组的惯性响应和频率响应能力先天不足,其大规模并网将使得系统频率稳定问题日益凸显。另一方面,随着特高压交直流输电工程的发展,由于直流闭锁故障造成的大功率缺失,易引发直流馈入受端电网的低频事故。上述两方面因素的作用,将导致频率控制“攻防”两端出现此消彼长的态势,从而使电力系统的频率稳定面临严峻的挑战。

[0003] 针对大功率缺失引发的电网频率骤降,快速精准的频率响应资源调用和低频减载控制是维持电力系统频率稳定的重要手段。最大频率偏移和频率最低点时间作为频率紧急控制的决策参量,对其进行准确地预测和估计尤为关键。

发明内容

[0004] 根据现有技术存在的问题,本发明公开了一种大功率缺失下频率最低点预测的仿真模型的建模方法。

[0005] 本发明的技术方案为:

[0006] 一种大功率缺失下频率最低点预测的仿真模型的建模方法,包括以下步骤:

[0007] S1:在大功率缺失下的频率响应过程中,各机组依据本地频率偏差进行功率调整。为模拟各机组的频率响应动态过程,需建立各机组调速器的传递函数,通常可由其冲激响应进行Laplace变换获得。为此,收集各机组的调门扰动试验曲线,亦即调速器的阶跃响应曲线。对各机组调速器阶跃响应曲线 $C_{unit,i}^{step}(t)$ 进行离散微分运算得到其冲激响应曲线 $C_{unit,i}^{pulse}(t)$;其中,t为响应时间,i为机组编号。

[0008] S2:利用n次多项式 $\tilde{C}_{unit,i}^{pulse}(t)$ 对冲激响应曲线 $C_{unit,i}^{pulse}(t)$ 在 $t \in [0, t_{fit}]$ 内进行拟合,从而获取各机组调速器冲激响应的时域解析表达式。

[0009] 所述的n次多项式 $\tilde{C}_{unit,i}^{pulse}(t)$ 如公式(1)所示:

$$[0010] \quad \tilde{C}_{unit,i}^{pulse}(t) = p_{unit,i}^{p0} + p_{unit,i}^{p1}t + \dots + p_{unit,i}^{pn}t^n \quad t \in [0, t_{fit}] \quad (1)$$

[0011] 式中: $\mathbf{p}_{unit,i}^{pulse} = [p_{unit,i}^{p0}, p_{unit,i}^{p1}, \dots, p_{unit,i}^{pn}]^T$ 为多项式拟合系数向量;t为响应时间;i为机组编号; t_{fit} 为时域拟合时长;n为拟合阶数。

[0012] S3:为求解各机组调速器冲激响应曲线的多项式拟合参数,定义拟合误差 $S_{unit,i}^{pulse}$,并计算冲激响应曲线中各采样点的均方误差。通过最小二乘法最小化累积拟合误差,求解

多项式拟合系数 $\mathbf{p}_{unit,i}^{pulse} = [p_{unit,i}^{p0}, p_{unit,i}^{p1}, \dots, p_{unit,i}^{pn}]^T$ 。

[0013] 所述的拟合误差 $S_{unit,i}^{pulse}$ 如公式 (2) 所示:

$$[0014] \quad S_{unit,i}^{pulse} = \min \sum_{k=1}^m \left[\tilde{C}_{unit,i}^{pulse}(t_k) - C_{unit,i}^{pulse}(t_k) \right]^2 \quad t_k \in [0, t_{fit}] \quad (2)$$

[0015] 式中: m 为时域拟合区间内的样本数量; k 为样本数据编号; i 为机组编号; t_k 为采样时间; t_{fit} 为时域拟合时长。

[0016] S4: 基于各机组调速器冲激响应的时域解析表达式, 利用Laplace变换求解其复频域内的传递函数。对步骤S2所得 n 次多项式 $\tilde{C}_{unit,i}^{pulse}(t)$ 进行Laplace变换, 求解调速器 i 的近似传递函数 $\tilde{G}_{unit,i}(s)$ 为:

$$[0017] \quad \tilde{G}_{unit,i}(s) = \mathcal{L} \left[\tilde{C}_{unit,i}^{pulse}(t) \right] = \sum_{l=0}^n \frac{p_{unit,i}^{pl}}{s^{l+1}} \cdot l! \quad (3)$$

[0018] 式中: t 为响应时间; s 为复频域算子; n 为拟合阶数; l 为拟合阶数编号; i 为机组编号; $p_{unit,i}^{pl}$ 为机组 i 的 n 次多项式拟合系数; \mathcal{L} 为Laplace变换。

[0019] S5: 系统频率响应是所辖区域内各机组频率响应的综合。在发生大功率缺失故障后, 所有机组共同参与频率响应过程, 其复频域内等效的调速器模型是前述各机组调速器模型的叠加。因此, 包含 N_G 台机组的系统等效调速器传递函数为:

$$[0020] \quad \tilde{G}_{sys}(s) = \sum_{i=1}^{N_G} K_i \tilde{G}_{unit,i}(s) = \mathbf{s}^T \Gamma \mathbf{p}_{sys}^{pulse} \quad (4)$$

[0021] 其中:

$$[0022] \quad \mathbf{s} = \left[\frac{1}{s}, \frac{1}{s^2}, \dots, \frac{1}{s^{n+1}} \right]^T \quad (5)$$

$$[0023] \quad \Gamma = \text{diag} \{0!, 1!, \dots, n!\} \quad (6)$$

$$[0024] \quad \mathbf{p}_{sys}^{pulse} = \sum_{i=1}^{N_G} K_i \mathbf{p}_{unit,i}^{pulse} \quad (7)$$

[0025] 式中: K_i 为标么值转换系数, 即从机组容量标么值转化为系统容量标么值; N_G 为系统内频率响应机组的数量; i 为机组编号; s 为复频域算子; n 为拟合阶数; l 为拟合阶数编号; $\mathbf{p}_{unit,i}^{pulse}$ 为机组调速器 i 冲激响应的多项式拟合系数向量; \mathbf{p}_{sys}^{pulse} 为系统等效调速器冲激响应的多项式拟合系数向量。

[0026] S6: 忽略系统网络结构的影响, 保留各机组调速器动态, 基于系统等效惯性和步骤S5所得的系统等效调速器传递函数建立大功率缺失下频率最低点预测的仿真模型。

[0027] 与现有技术相比, 本发明的有益效果为:

[0028] (1) 数据需求少。大功率缺失下频率最低点预测的仿真模型无须已知各调速器结构及参数, 仅对调门扰动试验曲线进行多项式拟合便可建立系统的频率响应模型。

[0029] (2) 模型阶数低。大功率缺失下频率最低点预测的仿真模型阶数不随机组数量增

多而进一步升高,有效提高了模型的求解计算速度。

[0030] (3) 计算精度高。多项式拟合阶数和拟合时长对模型求解结果影响不大,采用低阶模型便可获取较高的计算精度。

附图说明

[0031] 图1为大功率缺失下频率最低点预测仿真建模的流程图;

[0032] 图2为实施例频率最低点预测的仿真模型。

具体实施方式

[0033] 为使本发明的技术方案和优点更加清楚,下面结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚完整的描述,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本申请中记载的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0034] 如图1所示的一种大功率缺失下频率最低点预测的仿真建模流程,包括以下步骤:

[0035] S1:在大功率缺失下的频率响应过程中,各机组依据本地频率偏差进行功率调整。为模拟各机组的频率响应动态过程,需建立各机组调速器的传递函数,通常可由其冲激响应进行Laplace变换获得。为此,收集各机组的调门扰动试验曲线,亦即调速器的阶跃响应曲线。在本实施例中,共有10台发电机组,其中G1~G9为火电机组,采用IEEEG1型调速器,G10为水电机组,采用IEEEG3型调速器。对各机组调速器阶跃响应曲线 $C_{unit,i}^{step}(t)$ 进行离散微分运算得到其冲激响应曲线 $C_{unit,i}^{pulse}(t)$;其中,t为响应时间,i为机组编号。

[0036] S2:利用2次多项式对10台发电机组调速器的冲激响应曲线 $C_{unit,i}^{pulse}(t)$ 在0~5s内进行拟合,从而获取各机组调速器冲激响应的时域解析表达式。

[0037] 所述的2次多项式 $\tilde{C}_{unit,i}^{pulse}(t)$ 如公式(1)所示:

$$[0038] \quad \tilde{C}_{unit,i}^{pulse}(t) = p_{unit,i}^{p0} + p_{unit,i}^{p1}t + p_{unit,i}^{p2}t^2 \quad t \in [0,5] \quad (1)$$

[0039] 式中: $\mathbf{p}_{unit,i}^{pulse} = [p_{unit,i}^{p0}, p_{unit,i}^{p1}, p_{unit,i}^{p2}]^T$ 为多项式拟合系数向量;t为响应时间;i为机组编号;时域拟合时长 $t_{fit} = 5$ 。

[0040] S3:为求解各机组调速器冲激响应曲线的多项式拟合参数,定义拟合误差 $S_{unit,i}^{pulse}$,并计算冲激响应曲线中各采样点的均方误差。通过最小二乘法最小化累积拟合误差,求解多项式拟合系数 $\mathbf{p}_{unit,i}^{pulse} = [p_{unit,i}^{p0}, p_{unit,i}^{p1}, p_{unit,i}^{p2}]^T$:

[0041] 所述的拟合误差 $S_{unit,i}^{pulse}$ 如公式(2)所示:

$$[0042] \quad S_{unit,i}^{pulse} = \min \sum_{k=1}^m \left[\tilde{C}_{unit,i}^{pulse}(t_k) - C_{unit,i}^{pulse}(t_k) \right]^2 \quad t_k \in [0,5] \quad (2)$$

[0043] 式中:m为时域拟合区间内的样本数量;k为样本数据编号;i为机组编号; t_k 为采样时间;时域拟合时长 $t_{fit} = 5$ 。

[0044] 利用最小二乘法计算所得G1~G10调速器5s的二阶多项式拟合结果如表1所示。

[0045] 表1各机组二阶多项式拟合结果

	$P_{unit,i}^{p0}$	$P_{unit,i}^{p1}$	$P_{unit,i}^{p2}$
G1	3.4508	-1.5844	0.2053
G2	6.5061	-3.5497	0.5086
G3	4.0958	-2.2379	0.3218
G4	6.2778	-3.9030	0.6036
G5	4.8689	-2.4531	0.3386
G6	3.4553	-1.4056	0.1745
G7	5.7018	-3.4917	0.5361
G8	4.1271	-2.3605	0.3514
G9	2.8725	-0.9669	0.0998
G10	-0.9980	2.1267	-0.4216

[0046] S4:基于各机组调速器冲激响应的时域解析表达式,利用Laplace变换求解其复频域内的传递函数。对步骤S2所得2次多项式 $\tilde{C}_{unit,i}^{pulse}(t)$ 进行Laplace变换,求解调速器i的近似传递函数 $\tilde{G}_{unit,i}(s)$ 为:

$$[0048] \quad \tilde{G}_{unit,i}(s) = \frac{P_{unit,i}^{p0}}{s} + \frac{P_{unit,i}^{p1}}{s^2} + \frac{2 \cdot P_{unit,i}^{p2}}{s^3} \quad (3)$$

[0049] 式中:s为复频域算子; $P_{unit,i}^p$ 为机组i的多项式拟合系数;i为机组编号。

[0050] S5:系统频率响应是所辖区域内各机组频率响应的综合。在G6发生机组跳闸故障后,其余机组共同参与频率响应过程,其复频域内等效的调速器模型是前述各机组调速器模型的叠加。因此,包含10台发电机组的系统等效调速器传递函数为:

$$[0051] \quad \tilde{G}_{sys}(s) = \frac{0.4622}{s^3} + \frac{-1.7200}{s^2} + \frac{3.5768}{s} \quad (4)$$

[0052] 其中,标么值转换系数 $K = [0.5263 \ 0.0526 \ 0.0526 \ 0.0526 \ 0.0526 \ 0.0526 \ 0.0526 \ 0.0526 \ 0.0526 \ 0.0526]$ 。

[0053] S6:忽略系统网络结构的影响,保留各机组调速器动态,基于系统等效惯性和步骤S5所得的系统等效调速器传递函数建立大功率缺失下频率最低点预测的仿真模型如图2所示。

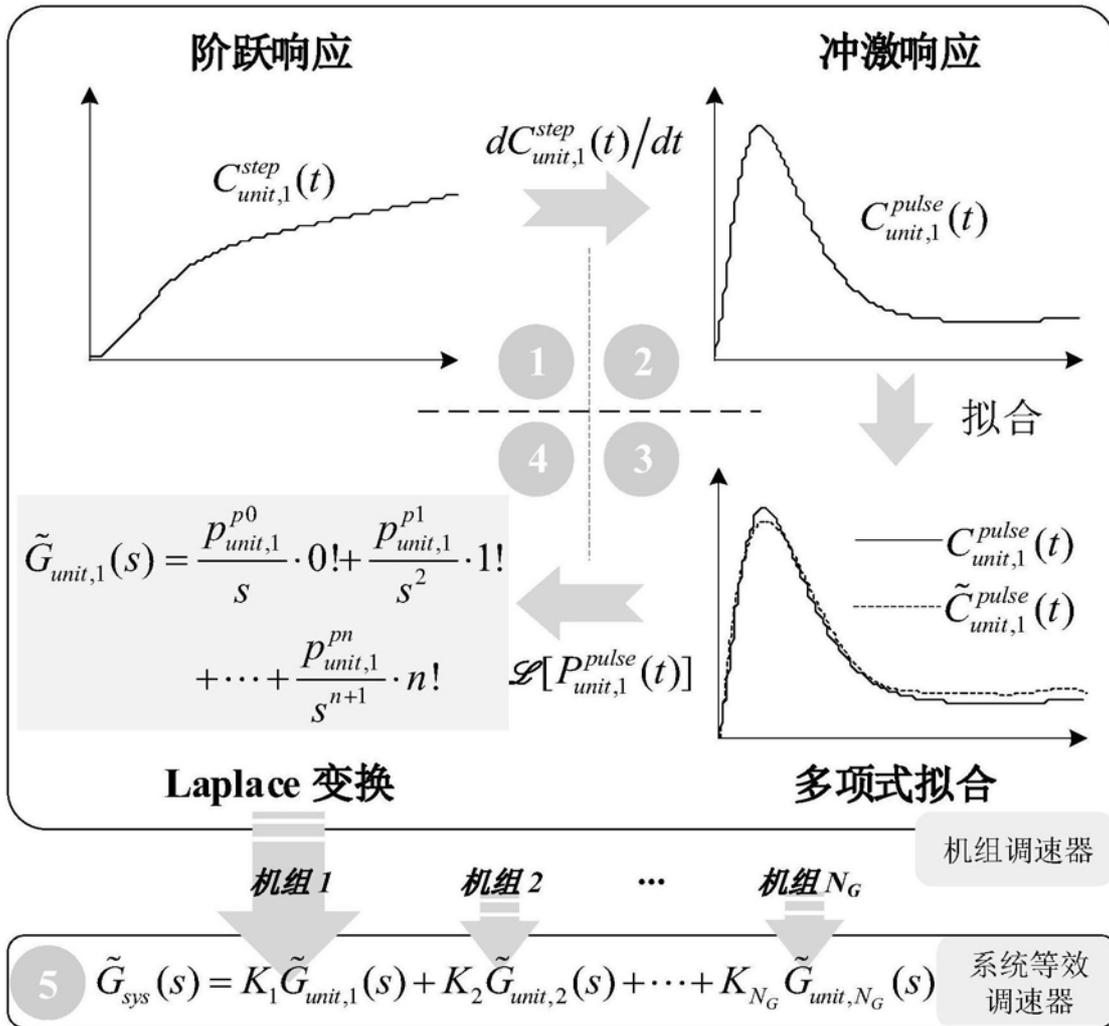


图1

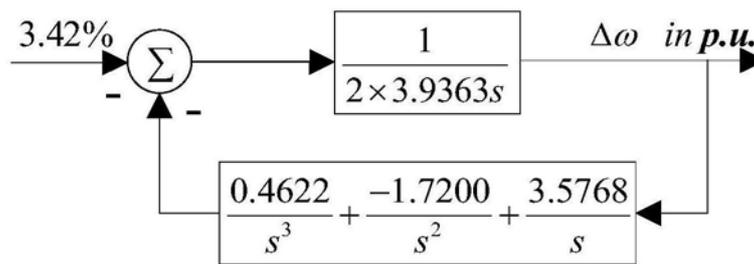


图2