



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105470950 A

(43) 申请公布日 2016. 04. 06

(21) 申请号 201510883892. 9

G06F 17/50(2006. 01)

(22) 申请日 2015. 12. 03

(71) 申请人 中国电力科学研究院

地址 100192 北京市海淀区清河小营东路
15号

申请人 国家电网公司 华北电力大学
国网河北省电力公司

(72) 发明人 杨国生 毕天姝 王晓阳 刘素梅
周泽昕 刘亚东 王志洁 薛志英
秦泽宁 王文焕 孙利强

(74) 专利代理机构 北京安博达知识产权代理有
限公司 11271

代理人 徐国文

(51) Int. Cl.

H02J 3/00(2006. 01)

H02J 3/38(2006. 01)

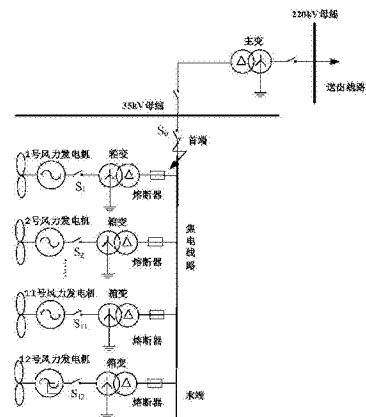
权利要求书1页 说明书6页 附图4页

(54) 发明名称

故障分析用永磁直驱风电场电磁暂态等值模型建立方法

(57) 摘要

本发明提供一种故障分析用永磁直驱风电场电磁暂态等值模型建立方法,所述模型建立方法包括:(1)将风电场内同一集电线路具有相似故障电磁暂态信息的风电机组划做同群(2)将同群风电机组等值分解为静态频率相关网络等值模型部分和动态低频等值模型部分(3)建立永磁直驱风电场电磁暂态等值模型。本发明所提永磁直驱风电场电磁暂态等值模型建立方法具有实现简单方便、仿真计算时间短且故障暂态过程模拟准确等优点。



1. 一种故障分析用永磁直驱风电场电磁暂态等值模型建立方法,其特征在于,所述模型建立方法包括:

(1)将风电场内同一集电线路上具有相似故障电磁暂态信息的风电机组划做同群;

(2)将同群风电机组等值分解为静态频率相关网络等值模型部分和动态低频等值模型部分;

(3)建立永磁直驱风电场电磁暂态等值模型。

2. 根据权利要求1所述的等值模型建立方法,其特征在于,所述静态频率相关网络等值模型部分包括集电线路及其上所有风电机组群的主电路部分;

所述动态低频等值模型部分包括网侧变换器主电路部分及相关测量单元、功率控制单元、电流控制单元和锁相环节。

3. 根据权利要求2所述的等值模型建立方法,其特征在于,所述静态频率相关网络等值模型部分建立方法包括:

1)将待等值的某一条集电线路与电网断开,同时闭锁集电线路上所有风电机组的网侧变换器;

2)向集电系统中注入由一系列单位幅值、频率取值范围均在0~50kHz的正弦信号组成的电流源;

3)监测集电线路上电流源出口处电压,同时利用傅立叶算法分析并提取该电压量中所有与电流源同频率的分量;

4)拟合所提取的电压分量和相应电流源频率分量的比值。

4. 根据权利要求2所述的等值模型建立方法,其特征在于,所述网侧变换器主电路部分近似等值为受控电流源;

所述测量单元用于测量永磁直驱风电机组并网点三相瞬时电压、瞬时电流和实际有功及无功功率,为风电机组功率、电流控制及锁相环电网电压定向提供实际被控量;

所述功率控制单元根据风电场主控制器和电网故障穿越要求提供的功率参考命令值和测量的实际功率,给出电流控制单元相应参考值;

所述电流控制单元中有功和无功分量参考值决定的流过网侧变换器的电流不应超过网侧变换器的最大允许电流;

所述锁相环节用于计算并网点正序电压的幅值和相角。

5. 根据权利要求1所述的等值模型建立方法,其特征在于,所述永磁直驱风电场电磁暂态等值模型以集电线路为基本单元进行建立。

6. 根据权利要求1所述的等值模型建立方法,其特征在于,所述划做同群的约束条件为等值前后故障电流波形一致。

故障分析用永磁直驱风电场电磁暂态等值模型建立方法

技术领域

[0001] 本发明属于新能源电源建模技术领域,尤其涉及一种故障分析用永磁直驱风电场电磁暂态等值模型建立方法。

背景技术

[0002] 风电在我国区域电网中所占比例的持续增加,使得所接电网故障特性将发生根本性改变,现有继电保护技术不再适用。尽管目前相关问题已引起了电力企业及相关科研院所的广泛关注,但是由于风电场故障特性依赖于电力电子变换器控制策略且这些控制策略未知,导致风电场故障分析等值计算模型未知,所接电网现有保护适应性分析及保护新原理研究缺乏理论支撑。在实际电网保护配置中,通常忽略风电场的影响,即将风电场视为负荷处理。

[0003] 事实上,相比于同步发电机,风电场故障暂态过程非常复杂,不仅包含场内不同位置处几十台甚至上百台单元风力发电机的电磁过渡过程,还包含大量电力电子变换器所用不同控制与保护回路之间的相互切换过程。这造成常规电压源串联阻抗的同步发电机故障分析模型并不适用于风电场,在电网保护研究中风电场究竟该如何等值处理是目前目前电力系统领域面临的核心瓶颈问题。

[0004] 然而,对于当前主流的永磁直驱风电机组来说,为不失真地模拟其并网用电力电子器件变换器的故障响应过程,需微秒级的数值仿真步长。因此,对于整个风电场而言,若通过逐一地建立场内几十台甚至上百台单元机组的详细故障暂态仿真模型,利用现有的仿真软件模拟其故障暂态过程(持续时间短,关注秒级故障电气量),所需数据运算量相当巨大,极易出现计算资源不足等问题。因此,决定风电场故障暂态过程仿真结果真实准确与否的关键要素是:风电场内单元机组究竟该如何分群并等值。

发明内容

[0005] 本发明提出一种故障分析用永磁直驱风电场电磁暂态等值模型建立方法,以等值前后故障电流波形一致为基本约束条件,实现对风电场内机组进行分群,在此基础上将同群风电机组等值分解为静态频率相关的网络等值模型部分和动态低频等值模型部分,进一步建立以集电线路上风电机组群为基本单元的风电场的多机等值方案。

[0006] 实现上述目的所采用的解决方案为:

[0007] 一种故障分析用永磁直驱风电场电磁暂态等值模型建立方法,所述模型建立方法包括:

[0008] (1)将风电场内同一集电线路具有相似故障电磁暂态信息的风电机组划做同群;

[0009] (2)将同群风电机组等值分解为静态频率相关网络等值模型部分和动态低频等值模型部分;

[0010] (3)建立永磁直驱风电场电磁暂态等值模型。

[0011] 优选的,所述静态频率相关网络等值模型部分包括集电线路及其上所有风电机组群的主电路部分;

[0012] 所述动态低频等值模型部分包括网侧变换器主电路部分及相关测量单元、功率控制单元、电流控制单元和锁相环节。该部分模型及相关参数通常可由风电机组厂商提供。

[0013] 进一步的,所述静态频率相关网络等值模型部分建立方法包括:

[0014] 1)将待等值的某一条集电线路从电网中断开,同时闭锁集电电路上所有风电机组的网侧变换器;

[0015] 2)向集电系统中注入由一系列单位幅值、频率取值范围均在0~50kHz的正弦信号组成的电流源;

[0016] 3)监测集电电路上电流源出口处电压,同时利用傅立叶算法分析并提取该电压量中所有与电流源同频率的分量;

[0017] 4)拟合所提取的电压分量和相应电流源频率分量的比值。

[0018] 进一步的,所述网侧变换器主电路部分近似等值为受控电流源;

[0019] 所述测量单元用于测量永磁直驱风电机组并网点三相瞬时电压、瞬时电流和实际有功及无功功率,为风电机组功率、电流控制及锁相环电网电压定向提供实际被控量;

[0020] 所述功率控制单元根据风电场主控制器和电网故障穿越要求提供的功率参考命令值和测量的实际功率,给出电流控制单元相应参考值;

[0021] 所述电流控制单元中有功和无功分量参考值决定的流过网侧变换器的电流不应超过网侧变换器的最大允许电流;

[0022] 所述锁相环节用于计算并网点正序电压的幅值和相角。

[0023] 优选的,所述永磁直驱风电场电磁暂态等值模型以集电线路为基本单元进行建立。

[0024] 优选的,所述划做同群的约束条件为等值前后故障电流波形一致。

[0025] 与现有技术相比,本发明具有以下有益效果:

[0026] 本发明所提出模型等值方法主要用于永磁直驱风电场故障暂态过程仿真模拟,以具有相似故障电磁暂态信息为原则,提出以风电场内同一集电电路上风电机组作为同群的分群原则,并对各机群进行模型降阶,从而给出降阶模型结构及相应参数计算方法,以此为基础,最终建立了永磁直驱风电场的多机等值模型。发明所提永磁直驱风电场电磁暂态等值模型建立方法具有实现简单方便、仿真计算时间短且故障暂态过程模拟准确等优点。

附图说明

[0027] 附图1:本发明的永磁直驱风电场汇集系统拓扑结构图;

[0028] 附图2:本发明的汇集电路上各台风机与及其上总短路电流变化曲线;

[0029] 附图3:本发明的汇集线故障下风机故障电流;

[0030] 附图4:本发明的汇集线故障电流频谱;

[0031] 附图5:本发明的集电线路风电机组群动态低频等值模型结构;

[0032] 附图6:本发明的含永磁直驱风电场的典型电网拓扑结构图;

[0033] 附图7:本发明的含电网故障下永磁直驱风电场电磁暂态响应特性曲线。

具体实施方式

[0034] 下面结合附图对本发明的具体实施方式做进一步的详细说明。

[0035] 本发明针对永磁直驱风电场,提出风电场电磁暂态模型等值方法,主要包括场内风电机组分群、风电机组群参数计算和多机等值模型建立三部分。

[0036] 结合我国现有风电场的广泛采用接线方式,即地理位置和风能资源分布相近的几台或者十几台的风电机组各自采用单机-单变方式汇集到某一条汇集线路上,多条汇集线路连接到某一条母线上,通过主变、送出线路并入系统,汇集线路可作为风电场内机组群划分的一个重要依据。

[0037] 为了揭示汇集线路所接永磁直驱风电机组群的故障电流特性,这里针对如图1所示的风电场典型拓扑结构,基于RTDS(Real Time Digital Simulator)实时仿真器建立了详细的汇集系统电磁暂态模型,相关参数源于实际电网数据,同时参照了电力网规划设计标准。汇集系统包含12台具有故障穿越能力的永磁直驱风电机组(同类型机组主要性能及参数一致)。

[0038] 由于风速大小和机端电压跌落程度是影响单台永磁直驱风电机组故障电流特性的主要因素。因此,针对汇集线路上风电机组群,各台机组所处相对地理位置和其感受的风速大小成为了影响单元机组之间对称故障电流差异的两个主要因素。其中,汇集线路距离通常较短,其上所接风电机组在空间上的分布范围相对很小,这也就意味着汇集线路不同位置处风电机组所感受到的风速差异不大。

[0039] 因此,以下将分析不同地理位置处单台风电机组及所接汇集线路上风电机组群故障电流的变化特性,包括瞬时故障电流的变化规律和其所含谐波量特性。

[0040] ●瞬时电流变化规律

[0041] 为了揭示极端故障场景下汇集线路上不同位置处风电机组短路电流特性的差异性,这里假定如图1所示风电场汇集线路上单元机组等间隔分布,相邻风电机组间线路长度为5km,离主变最近的1号风电机组与中压母线之间的线路长度为10km,汇集线路全长为70km(极端情况考虑)。设定在汇集线路首端处发生三相对称短路故障(持续时间为0.5s),且故障前后所有风电机组均额定运行(风速为12m/s)。

[0042] 事实上,故障后汇集线路上不同位置处风电机组机端电压跌落百分比差值均较小,不超过1%。图2为故障发生后1号、6号、12号永磁直驱风电机组提供的短路电流和流过汇集线路短路电流的变化曲线。由图中看出,单台风电机组、及其所接汇集线路总短路电流的变化曲线基本相似。各风机短路电流均于 $t=0.21s$ (故障后5ms)达到最大幅值0.188kA(2.44倍额定电流),故障后稳态电流幅值为0.11kA(1.45倍额定电流);汇集线总电流于 $t=0.21s$ 达到最大幅值2.31kA(2.5倍额定电流值),故障后稳态电流幅值1.33kA(1.45倍额定电流)。

[0043] ●电流主要频率分量分析

[0044] 针对上述汇集线路上风电机组及其总短路电流瞬时值,以下将分析其电流谐波含量及变化规律。图3为故障期间1号永磁直驱风电机组故障电流与汇集线总电流的FFT频谱曲线(频谱分辨率为2Hz)。

[0045] 由图3可知,单台永磁直驱型风电机组所提供短路电流中主要包括的频率分量为

工频50Hz分量(幅值为97.76A),而由永磁直驱风电机组群构成的汇集线总电流中主要包含的频率分量也为50Hz工频量(幅值为1154A),其幅值是单台风电机组工频电流量幅值的11.8倍,接近12倍。

[0046] 由上述分析可见,若汇集线路上不同位置处风电机组短路电流变化特性的差异很小,其与风电机组群短路电流的变化特性也基本相似,仅电流幅值大小有一定差异,即汇集线路总短路电流等于单台风电机组短路电流与汇集线路上风电机组总台数的乘积。这也就意味着风电场内一条集电线路上的风电机组群可用一台风电机组进行等值。

[0047] 在上述风电场内机组分群方法确定的前提下,如何按群进行模型参数聚合等值是进一步需要解决的问题。为解决该问题,本发明从风电场故障特性分析的角度出发,将集电线路上的风电机组群等值分解为静态频率相关的网络等值模型部分和动态低频等值模型部分,有效降低了现有单台风电机组电磁暂态模型的计算复杂度。

[0048] 其中,静态频率相关的网络等值模型部分包括集电线路及其上所有风电机组群的主电路部分,如集电系统的架空线路和电缆、风电机组并网用箱式变压器、滤波器等。该部分模型的暂态特性体现为电网故障下在可变频带宽度范围内(电磁暂态仿真的频带宽度通常为0~50kHz)上述主电路元件的动态响应行为特性。静态频率相关网络等值模型及其参数获取方法及步骤如下:

[0049] 1)将集电线路从电网中断开,同时使闭锁其上所有风电机组中的网侧变流器。

[0050] 2)向集电系统中注入电流源,该电流源由一系列单位幅值、频率范围0~50kHz的正弦信号组成。

[0051] 3)监测集电线路上的电流源出口处电压,同时利用傅立叶算法分析并提取该电压量中所有与电流源同频率的分量。

[0052] 4)利用如下函数拟合所提取的电压分量和相应电流源频率分量的比值。

[0053]

$$f_{fit}(s) = \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{s - a_i} + c + ds \quad (1)$$

[0054] 式中, a_i 、 b_i 、 c 、 d 均可通过相量拟合的方法获取,其中, a_i 和 b_i 分别表示不同频率下拟合阻抗动态响应过程的比例系数和时间常数, c 表示拟合稳态电阻值, d 表示拟合稳态电抗值。

[0055] 5)在含永磁直驱风电场电网的故障暂态特性分析用仿真软件中实现式(1)中静态频率相关的网络等值模型。

[0056] 另外,集电线路上的风电机组群的动态低频等值部分主要包括风电机组各自的网侧变换器及其控制回路,而并没有考虑风力机、机侧变换器及其相关控制器等的影响。动态低频等值模型部分主要体现风电机组群的低频相应动态特性(频率范围通常为0~20Hz),其模型结构如图4所示。

[0057] 一条集电线路上的风电机组群的动态低频等值模型中主要包括网侧变换器主电路部分及其相关测量单元、功率控制单元、电流控制单元和锁相环节。其中测量单元用于测量永磁直驱风电机组并网点三相瞬时电压、瞬时电流和实际有功及无功功率,为风电机组功率、电流控制及锁相环电网电压定向提供被实际控制量。功率控制单元根据风电场主控制器和电网故障穿越要求提供的功率参考命令值和测量的实际功率,给出电流控制器相应参

考值。网侧变换器主电路结构近似等值为受控电流源,其值大小主要由电流控制器的参考值决定,这里 需注意的是电流控制器模型中应考虑变换器最大允许电流值的限制,也就是说电流控制器中有功和无功分量参考值决定的流过网侧变换器的电流不应超过变换器的最大允许电流。锁相环节主要用于计算并网点正序电压的幅值和相角,为电流控制器中电网电压定向、实际有功和无功电流分量计算等所用。

[0058] 在上述风电机组群降阶等值模型建立的基础上,风电场的等值电磁暂态模型将以集电线路为基本单元进行建立。这样大大减小了风电场故障暂态过程仿真的计算量及计算时间,同时也兼顾到了等值模型的计算准确度。

[0059] 本实施例中永磁直驱风电场电磁暂态等值模型建立的工作原理过程为:

[0060] 以具有相似故障电磁暂态信息为原则,建立以风电场内同一集电线路上的风电机组作为同群的分群原则,从而对风电场内机组进行分群;在此基础上将同群风电机组等值分解为静态频率相关网络等值模型部分(包括集电线路及其上所有风电机组群的主电路部分)和动态低频等值模型部分(网侧变换器主电路部分及相关测量单元、功率控制单元、电流控制单元和锁相环节),从而简化风电机组中电力电子变换器及其控制系统故障暂态响应过程模拟的计算复杂度和计算时长;并进一步建立以大规模永磁直驱风电场的多机等值模型。

[0061] ●算例验证:

[0062] 利用RTDS仿真平台搭建如图5所示的含永磁直驱风电场的电网电磁暂态模型,对所提电磁暂态模型准确进行测试与分析。图中风电场中包含6条汇集线路,每条集电线路上的永磁直驱风电机组群利用一台相应类型风电机组进行等值(考虑到汇集线路上风电机组分散较集中,风速差异通常较小)。风电场内部6条汇集线路连接于同一主变下,各相邻汇集线路长度相差20km,即汇集线路 $AB=10\text{km}$, $AC=30\text{km}$, $AD=50\text{km}$, $AE=70\text{km}$, $AF=90\text{km}$, $AG=110\text{km}$ 。每条集电线路上的风电机组总额定容量为16.5MW(实际是由11台额定容量为1.5 MW风电机组构成),风电场额定容量为99MW,电网的等值短路容量为457MVA。

[0063] 设在如图5所示电网中送出线路的风电场侧发生三相接地短路故障。故障前风电场内所有风电机组的风速均为额定风速12m/s,也就意味着故障前风电场向电网提供99MW的有功功率。 $t=4.5\text{s}$ 发生三相短路故障,故障持续时间为0.15s。图6为基于永磁直驱风电场详细电磁暂态模型(包含每台风电机组的详细模型)和降阶等值模型下其故障暂态响应曲线。其中,风电场详细电磁暂态模型中每台风电机组部分包括风力机模型、永磁直驱发电机、机侧变换器、网侧变换器、滤波器、直流母线电容、Chopper电路、正常并网运行控制系统、故障穿越控制系统等。本发明所提永磁直驱风电场降阶等值模型

[0064] 从图6中可以看出,故障发生及切除后在不同模型下永磁直驱风电场向电网提供的有功、无功功率及有功与无功注入电流值的变化规律均具有较好一致性。基于详细电磁暂态模型和降阶等值模型下,由永磁直驱风电场向电网提供的有功和无功功率的相对误差最大值不超过8%,而有功和无功电流注入分量尽管在故障发生及切除后其相对误差较大(约为12%左右),但是它们在故障稳态期间误差值均不超过5%。这意味着,利用本发明所提永磁直驱风电场电磁暂态等值模型,在故障全过程中风电场向电网提供的功率以及注入电流分量等的最大误差均不会超过12%。因此,所提永磁直驱风电场等值电磁暂态模型建立方法具有较好的准确度,可较为真实地反映永磁直驱风电场在电网故障下的暂态响应特

性。

[0065] 上述算例充分证明,本发明所提的永磁直驱风电场电磁暂态等值模型建立方法能够有效适用于故障发生和切除全过程中风电场故障暂态特性的模拟,解决了目前利用已有仿真软件(如RSCAD、PSCAD等)对大规模风电场故障暂态过程模拟存在的计算复杂、计算量大、计算时间长甚至计算资源不足等问题,并保障了永磁直驱风电场故障暂态过程模拟的准确度,这为分析含大规模风电场电网继电保护适应性并提出保护新原理奠定了理论基础。因此,本发明所提永磁直驱电磁暂态模型等值建立方法具有较强理论意义和适用性。

[0066] 最后应当说明的是:以上实施例仅用于说明本申请的技术方案而非对其保护范围的限制,尽管参照上述实施例对本申请进行了详细的说明,所属领域的普通技术人员应当理解:本领域技术人员阅读本申请后依然可对申请的具体实施方式进行种种变更、修改或者等同替换,但这些变更、修改或者等同替换,均在申请待批的权利要求保护范围之内。

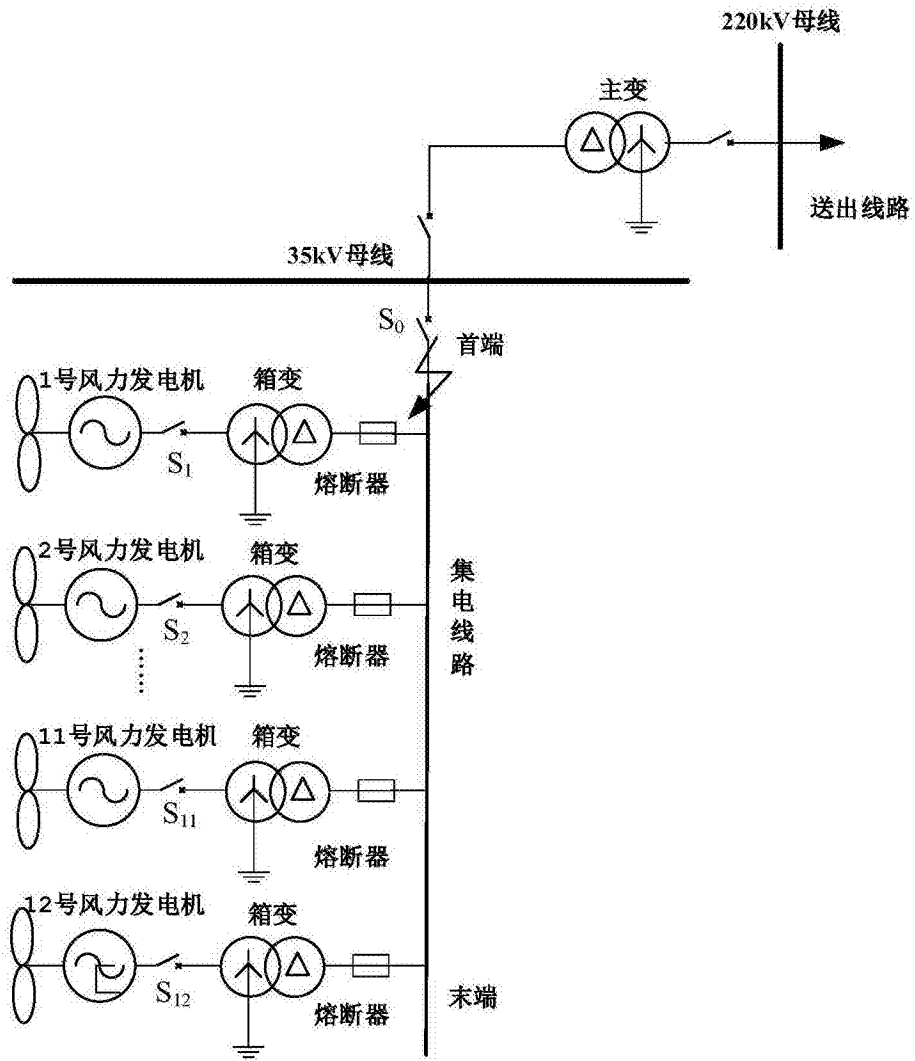


图1

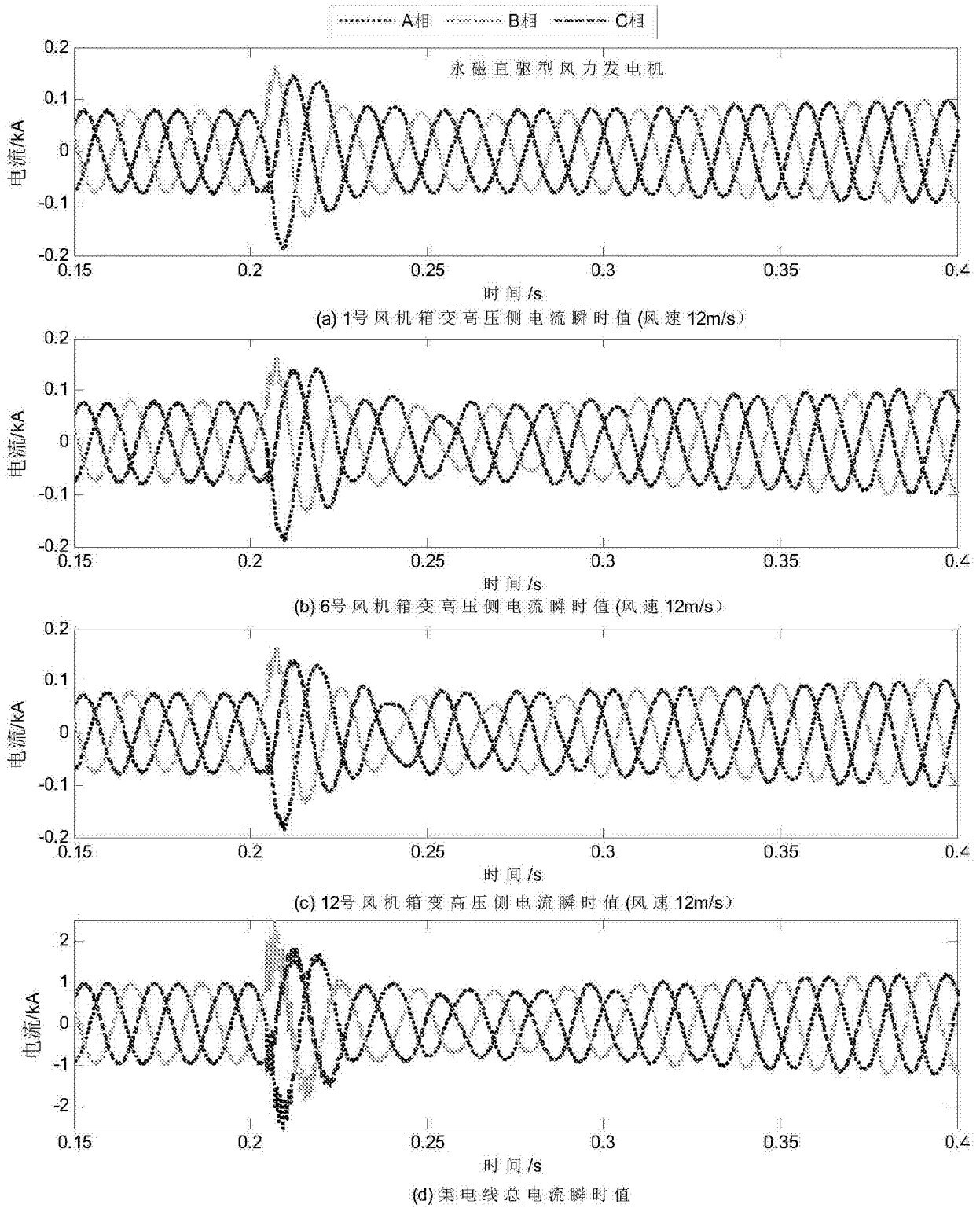
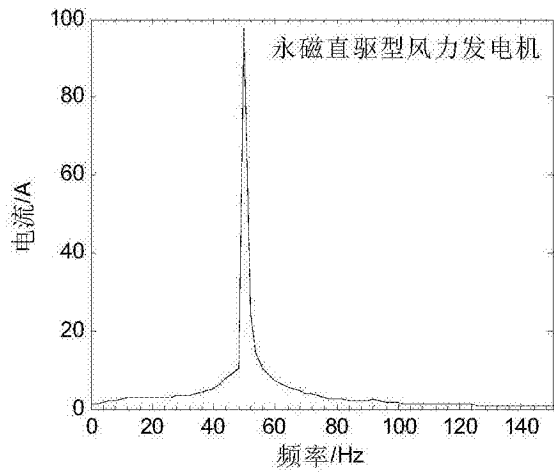
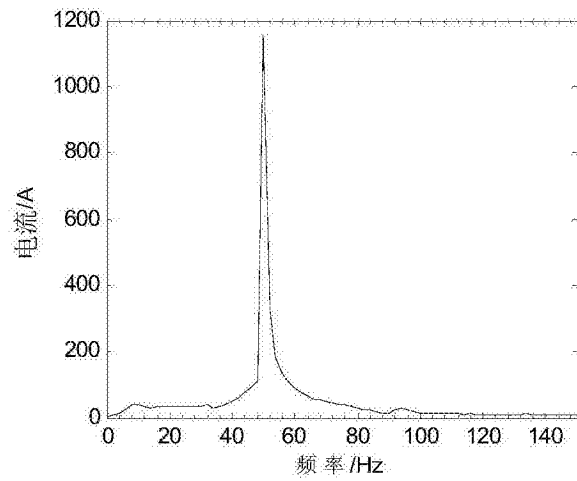


图2



(a) 1号风机故障电流A相频谱(风速12m/s)



(b) 集电线总电流

图3

图4

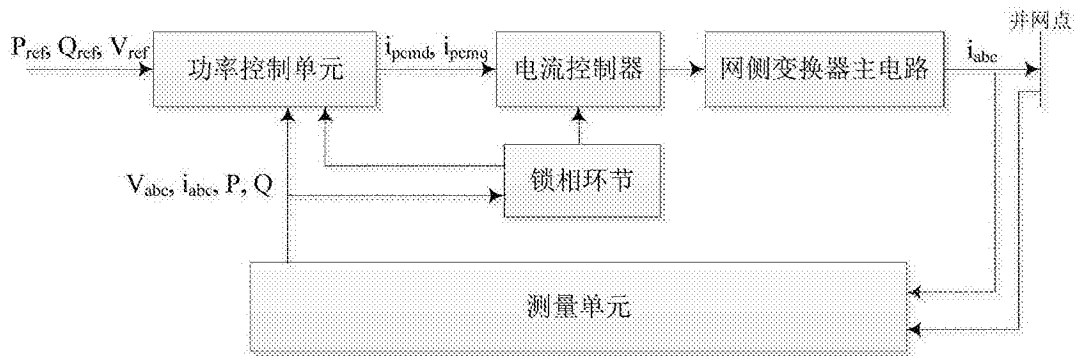


图5

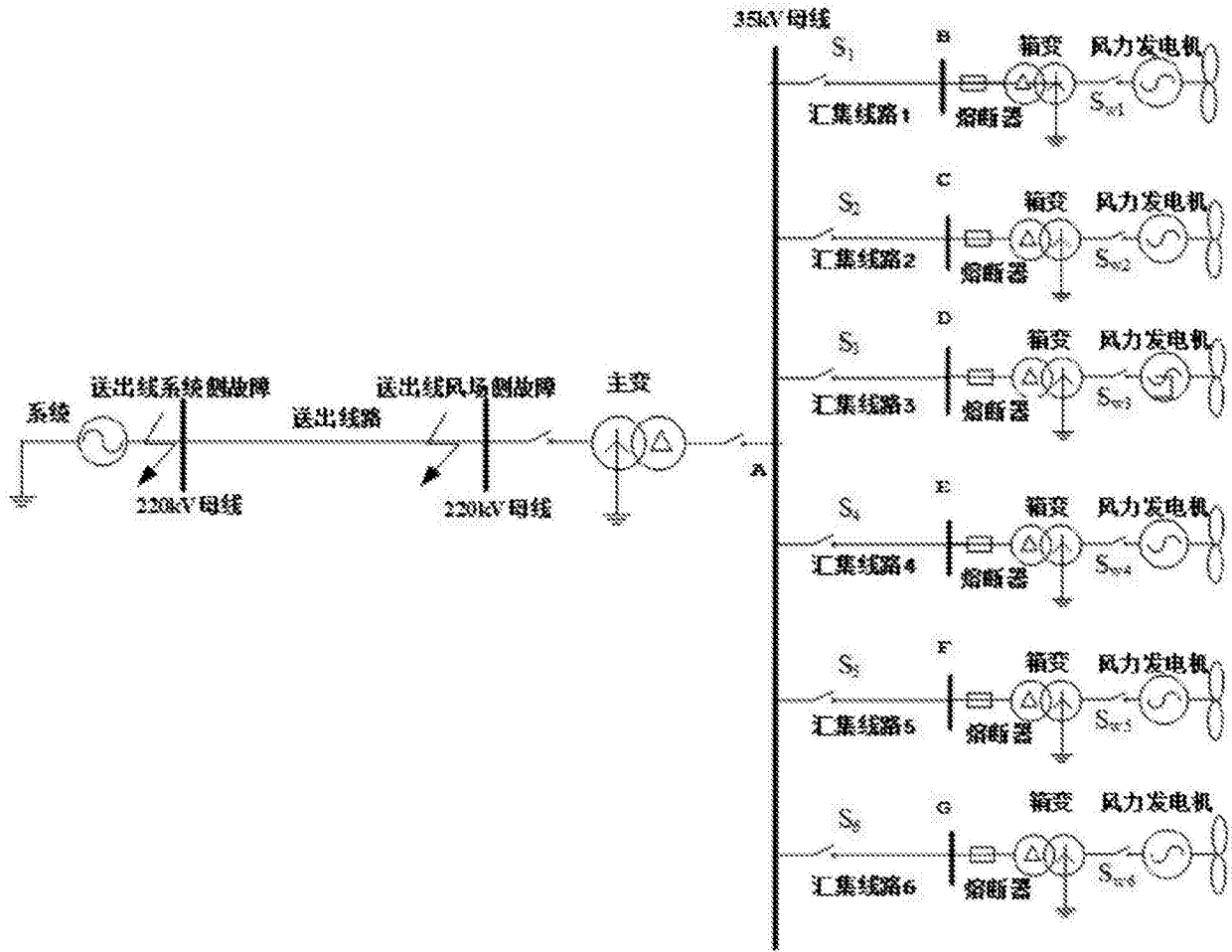


图6

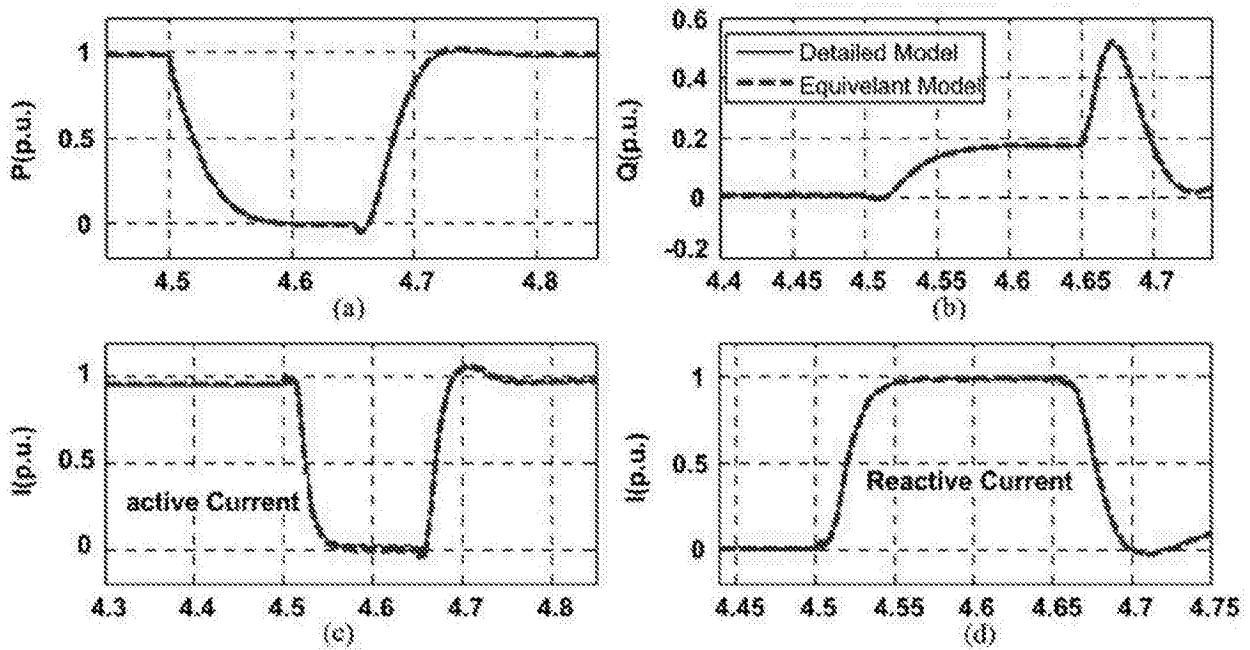


图7