

DOI: 10.7667/PSPC161363

基于DFIG控制方法的微电网的并网及孤岛运行方式分析

李林, 单喜斌, 宋宗勋

(国网山东威海供电公司, 山东 威海 264200)

摘要: 双馈异步发电机(Double Fed Induction Generators, DFIG)控制方法对微电网运行方式有着重要影响。重点研究主从控制方式下含DFIG微电网的运行特性。深入分析转子转速和励磁电压控制、桨距角控制、储能系统控制和用电负荷控制等DFIG控制功能模块,分别建立并网运行时的储能控制器和DFIG控制器的PQ模型,以及孤岛运行时主控制器的VF模型。基于Matlab平台仿真微电网在两种模式下的运行特点。仿真结果表明,由于大电网支撑,并网运行时微电网的电压具有更好的稳定性。孤岛运行时,同一性质的负荷对基于DFIG控制方法的微电网运行质量影响不大,而主要由微电网控制方法决定。

关键词: 双馈异步发电机; 微网; 孤岛; 控制方法; 运行方式

Operation mode analysis of micro-grid grid-connected and island based on DFIG control method

LI Lin, SHAN Xibin, SONG Zongxun

(Weihai Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Weihai 264200, China)

Abstract: Double fed induction generators (DFIG) control method has an important impact on micro-grid operation mode. The micro-grid operating characteristics containing DFIG under master-slave control mode is focused. DFIG control modules including excitation voltage and rotor speed control, pitch angle control, energy storage system control, and electrical load control are studied. And then PQ models of energy storage controller and DFIG controller when grid-connected operation and VF model of main controller when island operation are constructed. Operation characteristics of micro-grid under two modes are simulated based on Matlab platform. Simulation result shows that because of large-scale power grid support, micro-grid has more stable voltage when grid-connected operation; when island operation, load with the same nature has little effect on the operation quality of micro-grid based on DFIG control method, which is mainly determined by the micro-grid control method.

Key words: double fed induction generators; micro-grid; island; control method; operating mode

0 引言

作为绿色、环保能源最重要的一种方式,风力发电得到了飞速发展以及大规模应用,风电的广泛应用,改变了传统的电力系统结构和运行模式^[1]。风电可能以微电网并网运行的方式接入到传统电网中,也可能采用孤岛运行的方式,两种不同运行方式下风力发电的控制方法有较大差别^[2-3]。

另外,由于风力发电具有随机性和间歇性等特点,这将导致风力发电的运行方式更加多样化和复杂化。一般说来,并网运行时风电以微电网的形式可以向大电网输送较多的能源,在运行方式上有条件进行最大风功率跟踪,从而最大限度地提高风能的利用效率。孤岛运行时由于风能所在的微电网容

量通常比较小,微电网结构也比较脆弱,除了需要储能元件配合风电功率输出外,通常还需要对风能的输出功率进行控制以保持整个微电网的能量平衡,避免微电网出现崩溃等问题,这时,风力发电微电网又表现出不同于并网运行时的运行特点^[4-5]。

相对于永磁直驱同步发电机(Permanent-Magnet Synchronous Generators, PMSG)价格成本高,双馈异步发电机(Double Fed Induction Generators, DFIG)具有调速范围宽、变频器容量小和电机体积小等一系列优点而得到广泛的应用,成为目前风电机组的主流机型。基于DFIG控制方法的微电网运行方式,直接影响到微电网的平稳运行以及主电网的风能接纳能力,因此,本文将重点研究在并网及孤岛两种不同情形下,基于DFIG控制方法的微电网运行方式。

1 DFIG 控制方法

1.1 控制运行方式

含 DFIG 微电网主要包括主从控制、对等控制和分层控制三种控制方式^[6-7]。

分层控制方式虽然具有较好的控制效果, 但涉及微电网多个控制单元, 而且严重依赖于信息通信系统, 如果信息通信系统出现异常等问题, 将导致整个控制系统崩溃。在目前微电网信息通信系统还不是很成熟的背景下, 含 DFIG 微电网的分层控制在现场全面应用还有待时日。

对等控制方式中, 含 DFIG 微电网的各个控制单元都能主动参与调节, 易于实现微电网的即插即用功能, 但从控制原理上看, 对等控制方式属于有差控制, 存在鲁棒性不好等缺点, 目前的应用集中于实验研究阶段, 在当前现场应用上还有很多关键技术问题需要解决。

主从控制方式中, 在微网处于孤岛运行模式时, 一个控制单元采取定压和定频率控制方式(即 VF 控制), 其他控制单元采用定功率控制(即 PQ 控制)方式; 并网运行时, 由主电网提供电压和频率参考, 微电网所有控制单元采用 PQ 控制方式。主从控制方式可以实现电压和频率的无差控制, 得到了现场微电网工程广泛的应用, 但主从控制方式对主控单元的控制和运行性能有较大要求。

本文将重点研究主从控制方式下含 DFIG 微电网的运行特性, 建立如图 1 所示的含 DFIG 微电网研究模型, 整个微电网采用主从控制方式, 由于光伏风力具有间歇性特点, 不适宜作为主控制器, DFIG 控制只作为从控制器采用 PQ 控制方式。由于可控型分布式电源(比如微型燃气轮机)功率动态响应没那么快, 遇到功率或负荷突变时不一定能保证微电网稳定, 而储能装置控制性能稳定而且控制较为方便, 因此, 本文选择储能装置为主控单元展开研究。

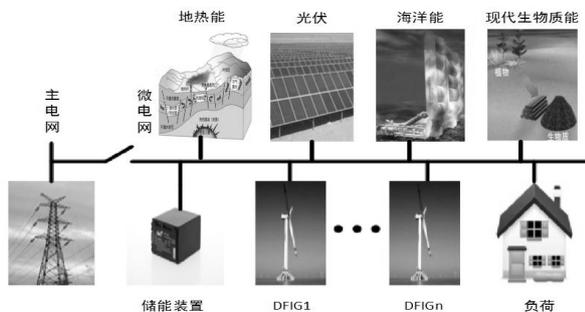


图 1 DFIG 微电网结构

Fig. 1 DFIG-based micro-grid structure

1.2 DFIG 运行控制特点

传统的风电机组大多采用并网运行的方式, 通过接入到主电网中, 风电机组可以简化为电流源输出, 但这无法满足在风机占据系统主导容量的微电网中的运行需要。基于 DFIG 的微电网, 存在并网和孤岛等不同的运行方式, 会呈现不同的运行特点。含 DFIG 控制单元的微电网, 需保持微电网运行过程中稳定的电压和频率, 避免由于风能随机性变化、负载波动和并网、孤岛运行方式切换等因素带来的各种扰动^[9]。

基于 DFIG 的微电网, 主要由转子转速和励磁电压控制、桨距角控制、储能系统控制和用电负荷控制等功能模块组成^[10], 如图 2 所示。其中, 桨距角控制、转子转速和励磁电压控制对 DFIG 进行调节, 直接决定 DFIG 的运行特性。

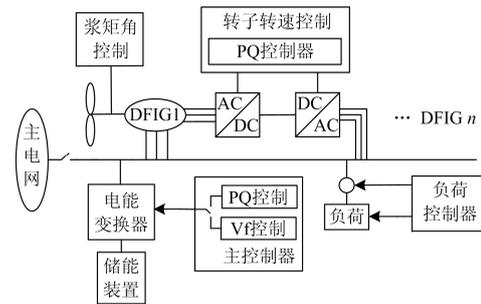


图 2 DFIG 微电网控制示意图

Fig. 2 DFIG-based micro-grid control diagram

为适应变速恒频运行需要, DFIG 多采用水平轴式变桨距控制的风力机实现风能的捕获。DFIG 本质上可以归结为一种绕线式转子电机, 绕线式转子电机最显著的特点之一, 是定子和转子都能向所连接的电网馈电。

DFIG 的定子直接连接到微电网母线, 实现向微电网输送功率。DFIG 的转子装配励磁调节装置, 转子的电能根据风电场的状况双向流动。当 DFIG 转速低于同步转速时, 微电网母线向 DFIG 转子提供交流励磁, 此时, DFIG 呈现的特征是仅由定子输送电能到微电网母线; 当 DFIG 转速高于同步速时, DFIG 呈现的特征是定子和转子同时向微电网母线输送电能; 当 DFIG 转速恰好为同步转速时, 则转子励磁为直流电源。在微电网由于负荷突变、能量不平衡等扰动时, 可通过快速控制励磁电流来改变 DFIG 转速, 利用 DFIG 转子动能减少微电网母线所遭受的扰动^[10-11]。

DFIG 根据风机的转速情况控制转子电流, 实现频率恒定的电能输出, 进而通过矢量变换控制, 解耦定、转子电流实现有功和无功的调节, 实现功

率的解耦控制。

通过对桨距角的控制,DFIG 可以根据电能需求实现对风能的利用。当微电网孤岛运行时,DFIG 根据微电网中的储能和用户负荷容量,通过调整桨距角,实现微电网的能量守恒;当微电网并网运行时,在主电网能够接纳风能的能力之内,DFIG 切换到捕捉最大风能的控制方式,实现风能的最大利用^[12]。

基于主从控制的 DFIG 微电网,含 DFIG 的控制单元能够在孤岛和并网等运行方式中灵活切换。运行在孤岛方式时,储能控制单元作为主控制器,采用 VF 控制以提供支撑微电网运行的电压和频率,DFIG 控制单元则采用 PQ 控制方式提供电源;当微电网并网到主电网运行时,此时微电网的电压和频率由与之相连的主电网提供,微电网的控制单元一般都采用 PQ 控制方式。

储能系统控制采用文献[13]的储能模型,将超级电容器和蓄电池组成的复合储能装置作为微电网孤岛运行时的主电源,控制运行过程中蓄电池往往处于浮充状态,超级电容器则可处于浮充状态或根据微电网电能质量控制的需要起到平抑功率波动的作用。用电负荷控制相对简单,根据用电负荷特性,对其进行相应的补偿控制。

2 含 DFIG 的微电网运行方式

基于主从控制的微电网并网运行时,可以依靠主电网维持微电网母线电压,因此 DFIG 逆变器和储能电压逆变器都采用 PQ 控制,实现 DFIG 能源的充分利用。当微电网处于孤岛运行时,由于 DFIG 的随机性,难以维持整个微电网母线电压,因此,储能装置逆变器作为主控单元,采用 VF 控制,DFIG 仍然采用 PQ 控制。

2.1 并网运行

当微电网并网运行时,储能装置逆变器与各个 DFIG 一样,都以 PQ 模式运行,PQ 控制模式如图 3 所示。由电网电压提供电压和频率参考,将 d 轴定向于电网电压矢量上,此时逆变器输出的有功功率和无功功率分别与 dq 轴输出电流分量 I_d 、 I_q 成正比。因此,通过控制 I_d 、 I_q 就可以对逆变器的有功和无功输出分别进行控制。

在 PQ 控制模式下,逆变器控制目标为给定的有功 P_{ref} 和无功功率 Q_{ref} ,为了减少功率闭环以简化控制结构,可以将 P_{ref} 、 Q_{ref} 通过式(1)转化为 I_{d_ref} 、 I_{q_ref} :

$$\begin{cases} I_{d_ref} = P_{ref} / u_d \\ I_{q_ref} = Q_{ref} / u_q \end{cases} \quad (1)$$

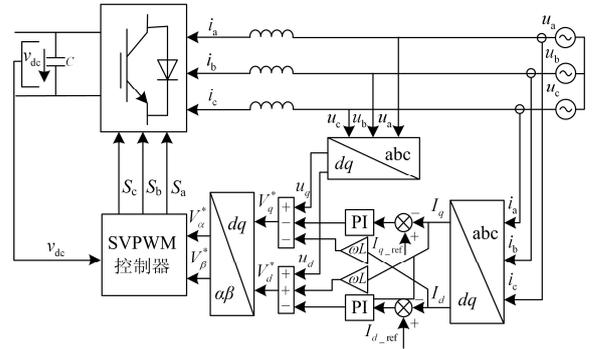


图 3 微电网 PQ 控制模型

Fig. 3 Micro-grid PQ control model

电流内环均采用 PI 控制以实现无差调节,则得到逆变器输出电压指令 v_q^* 、 v_d^* :

$$\begin{cases} v_q^* = u_q - \omega L i_d - \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s} \right) (i_{q_ref} - i_q) \\ v_d^* = u_d + \omega L i_q - \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s} \right) (i_{d_ref} - i_d) \end{cases} \quad (2)$$

根据式(2)获得 v_q^* 、 v_d^* 后,进行 $\alpha\beta$ 坐标变化,根据微电网的输出功率和负荷情况,采用 SVPWM 对全控电力电子元器件进行调节控制,微电网可能会从主电网中吸收有功或者无功,也可能向主电网送入有功或者无功。

2.2 孤岛运行

在孤岛运行时,储能装置逆变器采用 VF 控制,为 DFIG 提供电压和频率基准,负荷变化也主要由作为主控制器的储能装置逆变器来跟随,因此要求其功率输出应能够在一定范围内可控,且能够足够快地跟随负荷的波动。

储能装置逆变器在 VF 控制模式下,逆变器输出频率(50 Hz)由控制器内部的参考正弦信号生成,该信号为定向参考矢量,其与同步旋转坐标系的 d 轴重合, $\theta = \int 2\pi f dt$ 为 d 轴与 a 轴的夹角。在 dq 同步旋转坐标系下,主电源逆变器输出电压的 d 轴和 q 轴分量给定值 u_{dref} 、 u_{qref} 满足:

$$\begin{cases} u_{dref} = U_0 \\ u_{qref} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, U_0 为微电网线电压的额定值。通常采用电压、电流双闭环控制以实现恒压控制,电压外环输出结果作为电流内环的参考值。当采用 PI 控制器时,电压外环控制方程为

$$\begin{cases} i_{d_ref} = \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s} \right) (u_{d_ref} - u_d) \\ i_{q_ref} = \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s} \right) (u_{q_ref} - u_q) \end{cases} \quad (4)$$

在VF控制模式下,其电流内环结构框图与PQ控制相同,电流环控制方程同式(2)。结合电压、电流环控制方程,可以得到主控单元逆变器VF控制模式结构框图如图4所示。

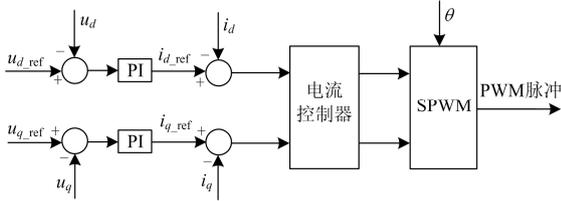


图4 主控单元VF控制模式下结构框图

Fig. 4 Structure diagram of VF control model for main control unit

基于DFIG的微电网在孤岛运行模式时,由于DFIG的随机性,通常采用储能装置作为主控制器。没有主电网的支撑作用,DFIG输出功率的变化和负荷大小的变化,都有可能基于DFIG微电网母线电压波动,从而影响整个微电网系统的正常运行,此时,就需要通过控制作为主控制器的储能装置,通过控制储能装置的充电或者放电过程,弥补DFIG输出功率随机性和负荷大小波动可能对微电网带来的能量不平衡。

但需要注意的是,在风电场实际应用中,由于受成本等因素制约,储能装置的能量存储量通常都非常有限,基于DFIG的微电网不可能完全依靠储能装置,长时间地实现微电网的能量平衡。比如处于孤岛运行状态的微电网负荷较轻时,储能系统将处于充电状态,如果DFIG发出的功率一直远大于微电网负荷所需的功率,那么储能系统将一直处于充电状态,当储能装置充电超过了其最大容量,则再也无法起到支撑微电网母线的作用,整个微电网则可能崩溃。而如果负荷过重,则储能装置将处于放电状态,但所能支撑微电网母线的的时间也是有限的,储能装置放电到一定时间就可能造成整个微电网母线的崩溃。

因此,基于DFIG的微电网处于孤岛运行模式时,当DFIG和负荷具有随机性时,由于储能装置容量有限,不大容易可以长时间支撑整个微电网,这时可以增加柴油发动机等共同组网,这更适合于完全独立型的微电网系统,这也是本文后续研究内容。

3 仿真分析

对基于DFIG控制方法的微电网的并网及孤岛运行方式进行仿真,在Matlab平台上搭建基于DFIG的微电网控制和运行模型,包括作为主控制单元的储能装置在孤岛运行时采用VF控制和并网时采用PQ控制,DFIG采用PQ控制,功率管的开关频率为7500 Hz,交流微电网电压为380 V,仿真采用的DFIG模型来自于参考文献[14],主要参数包括:额定功率为15 kW,定子额定电压为380 V/50 Hz,极对数 $P_n=3$,同步转速1000 r/min,定、转子绕组Y/y接法,绕组折算系数 $K_c=1.713$ 。

3.1 两种运行方式比较

分别考察微电网并网和孤岛状态下的运行情况,重点观察微电网母线电压和连接到母线的各个微电网支路的电流变化情况。

微电网在并网和孤岛两种情况下,首先DFIG和储能装置带一定的负荷运行,并在0.2 s时刻增加负荷,观察负荷变化给微电网运行带来的影响。

并网情况下,微电网母线电压如图5所示,在0.2 s时刻增加负荷时微电网母线电压几乎不受影响,这是因为微电网并网后由主电网来支撑母线电压。

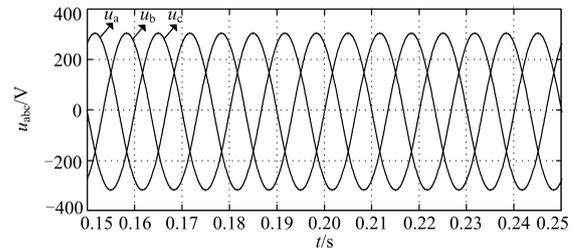


图5 并网运行时微电网母线电压

Fig. 5 Micro-grid bus voltage in grid-connected

孤岛情况下,微电网母线电压则发生较为明显的变化,如图6所示,在0.2 s时刻,由于微电网负荷突然增加,作为主从控制单元的储能装置和DFIG还来不及调整控制,由于此时刻整个微电网电能供给暂时性地不足以支撑所增加的负荷,导致微电网母线电压在0.2时刻开始有比较明显的下降;但作为主控制器的储能装置,检测到电压变化后,采用VF控制恢复微电网母线电压;同时,采用PQ控制的DFIG也将增加功率输出,维持微电网的电能平衡。在整个微电网控制系统作用下,微电网母线电压逐步地恢复,重新实现整个微电网的平衡运行。

从仿真结果可知,并网运行时,由于主电网的支撑,微电网具有较好的运行稳定性;孤岛运行时,

微电网系统较容易受到负荷变化等干扰而出现运行波动的情况，而且微电网波动的激烈程度取决于储能装置容量、负荷变化大小等多种因素共同作用。

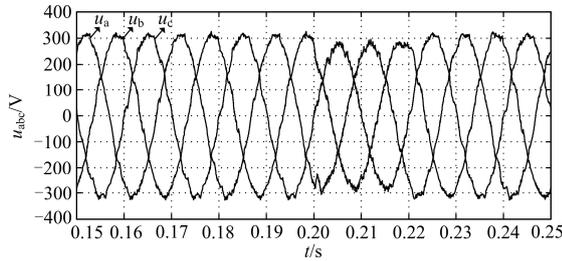


图 6 孤岛运行时微电网母线电压
Fig. 6 Micro-grid bus voltage in island

微电网 DFIG 支路电流变化情况在并网和孤岛运行时都比较接近，限于文章篇幅，下文将以孤岛运行情况为例，重点介绍微电网 DFIG 支路电流变化情况。

3.2 孤岛运行时运行情况

孤岛运行时，微电网 DFIG 支路电流变化如图 7 所示。0.2 s 负荷增加后，DFIG 采用 PQ 控制方式，对应地增加电流输出，以期平衡负荷增加所需的电能，并很快进入电流较大的稳定运行状态中。

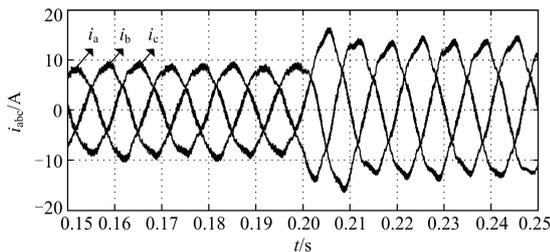


图 7 孤岛运行时 DFIG 电流
Fig. 7 DFIG current in island

截取负载增加前后的 DFIG 电流波形，分别进行谐波分析，图 8 和图 9 分别是负载增加前和负载增加后的 DFIG 电力谐波分析图。由图可以看出，DFIG 电力谐波在负载增加前、后的变化不大，谐波分量都较为稳定，谐波主要集中在 DFIG 采用 PQ 方法控制电力电子元器件所体现出来的特征谐波，其中 150 和 300 次谐波比较大，是因为功率管的开关频率为 7500 Hz，正好是 150 倍频，开关频率及其整数倍附近谐波比较大。

从图 7 和图 8 的 DFIG 电流谐波分析还可以看出：虽然负载刚增加时候的电流波形变差，但从具体的谐波含量分析来看，负载增加前、后谐波含量分别为 6.12%和 5.43%，在负载增加后谐波总体数值反倒下降，这是因为加大负载后，DFIG 采用 PQ 控制后基波电流增大的缘故。从 DFIG 电流运行特

点也可以看出，微电网控制策略和控制方法对其运行特性有直接影响。

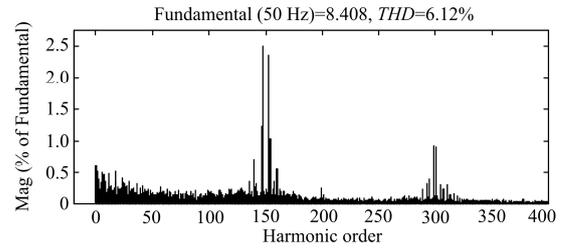


图 8 负载增加前的 DFIG 电流谐波
Fig. 8 DFIG current harmonic before adding load

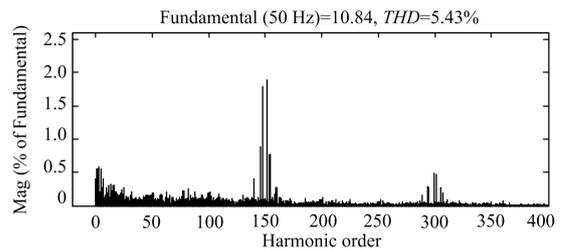


图 9 负载增加后的 DFIG 电流谐波
Fig. 9 DFIG current harmonic after adding load

4 结论

随着风电场的应用越来越广泛，研究基于 DFIG 控制方法的微电网运行方式有着工程实际意义。本文在比较微电网经典控制方法的基础上，重点研究主从控制方式下含 DFIG 微电网的运行特性。深入分析 DFIG 控制特点和各个功能模块，分别建立并网运行时的储能控制器和 DFIG 控制器的 PQ 模型，以及孤岛运行时主控制器的 VF 模型。仿真结果表明，比较并网运行时主电网对微电网母线的电压支撑作用，孤岛运行时微电网母线电压较容易受到干扰，但同一性质的负荷对基于 DFIG 控制方法的微电网运行质量影响不大，而主要由微电网控制方法决定。因此，结合 DFIG 运行特性，研究性能更优的基于 DFIG 微电网的控制方法和策略将是本文后续研究的重点。

参考文献

[1] 付文秀, 范春菊. SVG 在双馈风力发电系统电压无功控制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 61-68.

FU Wenxiu, FAN Chunju. Application of SVG in voltage and reactive power control of doubly-fed induction generation system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 61-68.

[2] 齐尚敏, 李凤婷, 何世恩, 等. 具有低电压穿越能力的

- 集群接入风电场故障特性仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 55-62.
- QI Shangmin, LI Fengting, HE Shien, et al. Research on fault characteristics of grid-connected large scale wind farms with LVRT capability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 55-62.
- [3] 张元, 郝丽丽, 戴嘉祺. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 138-146.
- ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi. Overview of the equivalent model research for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 138-146.
- [4] 李岩松, 郭世繁, 任国威. 双馈式风力发电系统的机电暂态建模与运行分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 101-109.
- LI Yansong, GUO Shifan, REN Guowei. Modelling and operation simulation of doubly-fed type wind power generation system electromechanical transient model[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 101-109.
- [5] 王志新, 吴杰, 徐烈, 等. 大型海上风电场并网VSCHVDC变流器关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 14-27.
- WANG Zhixin, WU Jie, XU Lie, et al. Key technologies of large offshore wind farm VSC-HVDC converters for grid integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 14-27.
- [6] XU L, WANG Y. Dynamic modeling and control of DFIG-based wind turbines under unbalanced network conditions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 314-323.
- [7] 秦超, 刘艳丽, 余贻鑫, 等. 含双馈风机电力系统的动态安全域[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 157-163.
- QIN Chao, LIU Yanli, YU Yixin, et al. Dynamic security region of power systems with double fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 157-163.
- [8] 郝正航, 余贻鑫, 曾沅. 双馈风力发电机功角暂态行为及其控制策略[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(2): 79-83.
- HAO Zhenghang, YU Yixin, ZENG Yuan. Transient performance of DFIG power angle in wind farm and its control strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(2): 79-83.
- [9] 王松, 李庚银, 周明. 双馈风力发电机组无功调节机理及无功控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2714-2720.
- WANG Song, LI Gengyin, ZHOU Ming. The reactive power adjusting mechanism & control strategy of doubly fed induction generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2714-2720.
- [10] 向大为, 杨顺昌, 冉立. 电网对称故障时双馈感应发电机不脱网运行的系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 130-135.
- XIANG Dawei, YANG Shunchang, RAN Li. Ride through control strategy of a doubly fed induction generator for symmetrical grid fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 130-135.
- [11] 王振树, 刘岩, 雷鸣, 等. 基于Crowbar的双馈机组风电场等值模型及并网仿真分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 44-51.
- WANG Zhenshu, LIU Yan, LEI Ming, et al. Doubly-fed induction generator wind farm aggregated model based on Crowbar and integration simulation analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 44-51.
- [12] 周念成, 池源, 王强钢. 含非线性及不平衡负荷的微电网控制策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 61-66.
- ZHOU Niancheng, CHI Yuan, WANG Qianggang. Control strategies for microgrid containing non-linear and unbalanced loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 61-66.
- [13] 刘志文, 夏文波, 刘明波. 基于复合储能的微电网运行模式平滑切换控制[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 15-20.
- LIU Zhiwen, XIA Wenbo, LIU Mingbo. Control method and strategy for smooth switching of microgrid operation modes based on complex energy storage[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 15-20.
- [14] 刘其辉. 变速恒频风力发电系统运行与控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

收稿日期: 2016-08-11; 修回日期: 2016-10-13

作者简介:

李林(1965—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事电力系统自动化工作;

单喜斌(1972—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事电力系统自动化工作;

宋宗勋(1974—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事电力系统自动化、继电保护工作。

(编辑 张爱琴)