

双馈型风电场双层无功分配策略

张 文¹, 阙 波², 韦古强³, 刘卫东¹, 陈光明¹

(1. 都城绿色能源有限公司, 北京 100020; 2. 国网浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007;
3. 鲁能集团有限公司, 北京 100020)

摘要:针对风力发电效率普遍较低的问题,从减少风电场及风电机组有功损耗的角度出发,提出一种双馈型风电场双层无功分配策略。该策略在传统无功分配策略的基础上,考虑电机定子、网侧变流器功率极限,实现以有功损耗最小为目标的优化分配,以提高风电场发电效率。基于 Matlab/Simulink 平台搭建双馈风电场仿真模型,仿真结果验证了该控制策略能大大减小机组内部功率损耗,提升风电场发电效率,同时还能有效抑制由于电网负荷变化导致的电压波动,提升电能质量。

关键词:双馈型风电场;功率极限;双层无功分配;功率损耗;发电效率

中图分类号:R730.58

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2017)01-0079-05

我国风电产业有着不可限量的发展潜力。风能丰富但利用效率低削弱了风电在激烈的能源竞争和高成本形势下的优势。风电场并网电压不稳定、发电效率低是制约风电发展的两大瓶颈^[1,2]。双馈风电机组本身可作为无功源,其有功和无功实行解耦控制,机组的定子侧和网侧变流器均能够向电网注入无功,有着充足的无功调节能力。因此,随着双馈风电场的规模化,协调风电场内无功补偿设备和各机组无功调节能力,优化无功调度计划分配是提高并网点电压稳定和风电发电效率的关键。

在双馈型风电场中,完善的无功分配涉及2个层面:一是对风电场内各无功补偿设备和风电机组的无功出力协调控制、合理分配;二是利用双馈风电机组的定子侧和网侧变流器的无功补偿能力,在其间采用一定的控制方法合理分配无功出力。在风电场无功协调控制上,文献[3]综合考虑双馈风力发电机的运行效率和工况性能,优化选择励磁电流的不同组合,将励磁电流平均分配到定子和转子电流,减小了双馈电机自身的无功损耗,实现了风电场无功优化分配;文献[4]针对分散式风电场,提出一种分散式风电场配电网多目标优化策略,包括3层功率控制系统;在双馈风电机组无功控制上,文献[5]为了提升电压波动下风电场的无功调节能力,提出综合考虑机群之间的相互配合以及转子侧、网侧变流器的功率极限的分层控制方案,能有效抑制控制点电压波动;文献[6]提出了双层无功分配策略,实现恒电压控制的同时,提高了风电发

电效率。这些无功分配原则大都以提高电压稳定为目标,并没有从风电场有功损耗最小的角度出发。

针对以上问题,文中提出了以风电场有功损耗最小为目标的双馈型风电场双层无功分配策略,在抑制电压波动、改善电压质量的同时,提升风电场发电效率,提高风能的利用率,增强风力发电竞争力。

1 风电场无功功率限值与分配

1.1 风电场无功极限计算

双馈风电机组并网运行时,风机定子直接接入电网,转子通过背靠背连接的电压型 PWM 变换器与电网相连。风电机组输入电网的无功功率为^[7]:

$$Q_g = Q_s - Q_c \quad (1)$$

式中: Q_g 为双馈风机流入电网的无功功率; Q_s 为定子发出的无功功率; Q_c 为网侧变流器从电网输入的无功功率。

考虑到定子侧无功功率运行范围受定、转子侧变流器的电流限制影响,设有功功率 P_s 给定, U_s 为定子电压, I_{rmax} , I_{smax} 分别为转子侧变流器、定子侧电流的最大值, X_s , X_m 分别为定子漏抗和励磁电抗,则定子无功功率的范围为:

$$Q_{smin} \leq Q_s \leq Q_{smax} \quad (2)$$

式中: Q_{smin} 和 Q_{smax} 分别为定子无功功率的最小、最大值,且:

$$Q_{smin} = -\sqrt{(3U_s I_{smax})^2 - P_s^2}$$

$$Q_{smax} = \sqrt{(3U_s I_{rmax})^2 - P_s^2} - \frac{3U_s^2}{X_s + X_m} \quad (3)$$

根据变流器本身的最大容量考虑网侧变流器的功率极限,设网侧变流器设计的最大容量为 S_{cmax} ,同步转速与定子转速的转差率为 s ,则网侧变

收稿日期:2016-08-16;修回日期:2016-10-14

基金项目:国家电网公司科技项目(国家电网科[2015]709号文)资助

流器无功功率的范围为:

$$Q_{\text{cmin}} \leq Q_{\text{c}} \leq Q_{\text{cmax}} \quad (4)$$

式中: Q_{cmin} 和 Q_{cmax} 分别为网侧变流器无功功率的最小值和最大值,且:

$$\begin{aligned} Q_{\text{cmin}} &= -\sqrt{S_{\text{cmax}}^2 - (sP_{\text{s}})^2} \\ Q_{\text{cmax}} &= \sqrt{S_{\text{cmax}}^2 - (sP_{\text{s}})^2} \end{aligned} \quad (5)$$

因此,考虑到网侧变流器的无功发生能力,双馈风电机组的无功功率为:

$$\begin{cases} Q_{\text{gmin}} = Q_{\text{smin}} - Q_{\text{cmax}} \\ Q_{\text{gmax}} = Q_{\text{smax}} - Q_{\text{cmin}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: Q_{gmin} 和 Q_{gmax} 分别为双馈风机流入电网的无功功率最小值和最大值,且:

$$\begin{cases} Q_{\text{gmax}} = \sqrt{(3U_{\text{s}}I_{\text{rmax}})^2 - P_{\text{s}}^2} + \sqrt{S_{\text{cmax}}^2 - (sP_{\text{s}})^2} \\ Q_{\text{gmin}} = -\sqrt{(3U_{\text{s}}I_{\text{rmax}})^2 - P_{\text{s}}^2} - \sqrt{S_{\text{cmax}}^2 - (sP_{\text{s}})^2} \end{cases} \quad (7)$$

不考虑无功补偿装置,对于有 n 台双馈风电机组的风电场,整个风电场的无功发生极限为:

$$\begin{cases} Q_{\text{tmax}} = \sum_{i=1}^n Q_{\text{gimax}} \\ Q_{\text{tmin}} = \sum_{i=1}^n Q_{\text{gimin}} \end{cases} \quad (8)$$

在风电场无功需求整定的过程中,监控系统通过信息采集实时计算整个风电场的无功发生极限 Q_{tmax} ,并将其传送给电网调度系统,电网调度系统结合风电场的实时运行参数,以无功发生极限为限,确定整个风电场的无功功率出力计划参考值 $Q_{\text{ref}} \leq Q_{\text{tmax}}$,将此参考值传送至风电场监控系统,由监控系统进行风电场内各机组间的无功分配。

1.2 基于等微增率的风机无功优化分配

考虑风电场内风力发电机、变压器和集电线路在内的有功网损最小的目标函数为^[8]:

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^n (AQ_{\text{mi}}^2 + BQ_{\text{mi}} + C) \quad (9)$$

式中: A, B, C 为系数,分别为:

$$\begin{cases} A = \frac{R_{\text{Ti}} + R_{\text{Li}}}{U_{\text{i}}^2} + D \\ B = 2D\Delta Q_{\text{i}} + \frac{2X_{\text{li}}R_{\text{2i}}}{X_{\text{mi}}^2} \\ C = D\Delta Q_{\text{i}}^2 + \frac{2X_{\text{li}}R_{\text{2i}}}{X_{\text{mi}}^2}\Delta Q_{\text{i}} + DP_{\text{li}}^2 + \frac{2R_{\text{li}}R_{\text{2i}}U_{\text{li}}^2P_{\text{li}} + 3R_{\text{2i}}U_{\text{li}}^2}{U_{\text{li}}^2X_{\text{mi}}^2} \end{cases} \quad (10)$$

其中:

$$D = \frac{X_{\text{mi}}^2R_{\text{li}} + R_{\text{li}}^2R_{\text{2i}} + X_{\text{li}}^2R_{\text{2i}}}{3U_{\text{li}}^2X_{\text{mi}}^2} \quad (11)$$

式中: P_{mi} 和 Q_{mi} 分别为第 i 台双馈机组注入母线侧的有功、无功注入量; U_{i} 为第 i 台双馈机组箱变高压侧母线电压; R_{Ti} 和 R_{Li} 分别为折算到箱变高压侧的电阻和集电线路电阻; U_{li} 为第 i 台风机的定子端电压; $X_{\text{li}} = X_{\text{si}} + X_{\text{mi}}$, $X_{\text{2i}} = X_{\text{ri}} + X_{\text{mi}}$, 其中, X_{si} 、 X_{ri} 、 X_{mi} 分别为第 i 台风机的定、转子漏抗和励磁漏抗; R_{li} 和 R_{2i} 分别为第 i 台风机定子电阻和转子电阻; P_{li} 为第 i 台风机定子侧的输出功率; Q_{i} 为变压器和集电线路无功损耗之和,可由计算获得,也可通过实验测量得到。

风电场无功约束条件为:

$$\sum_{i=1}^n Q_{\text{mi}} - Q_{\text{ref}} = 0 \quad (12)$$

单台风力发电机无功约束条件为:

$$\begin{aligned} -\sqrt{\frac{9U_{\text{li}}^4(1-s)^2}{4R_{\text{li}}^2} + \frac{9(k\omega_{\text{i}}^3 - P_{\text{s}})}{4R_{\text{li}}}} - \Delta Q_{\text{i}} \leq Q_{\text{mi}} \leq \\ \sqrt{\frac{9U_{\text{li}}^4(1-s)^2}{4R_{\text{li}}^2} + \frac{3(k\omega_{\text{i}}^3 - P_{\text{s}})}{R_{\text{li}}}} - \Delta Q_{\text{i}} \end{aligned} \quad (13)$$

利用等微增率法求解。经整理最终得到:

$$Q_{\text{mi}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{B_{\text{i}}}{2A_{\text{i}}} - B_{\text{i}} \sum_{i=1}^n \frac{1}{2A_{\text{i}}} + Q_{\text{ref}}}{A_{\text{i}} \sum_{i=1}^n \frac{1}{A_{\text{i}}}} \quad (14)$$

则第 i 台风电机组的无功出力参考值为:

$$Q_{\text{giref}} = \Delta Q_{\text{i}} + Q_{\text{mi}} \quad (15)$$

2 双层无功分配策略

2.1 场内无功分配层

场内无功控制层根据电网调度中心所输出的无功功率出力计划 Q_{ref} 对双馈型风电场内所有机组进行无功出力任务分配,求解网损最小优化各台风机无功出力为 Q_{giref} ,当无功出力计划 Q_{giref} 大于机组无功极限时,机组按最大无功出力 Q_{gimax} 进入到下一层分配,多余无功由风电场无功补偿设备集中提供;当无功出力计划 Q_{giref} 小于机组无功极限时,机组按优化值进入到下一层分配。场内无功分配控制方案如图 1 所示。

2.2 机组内无功分配层

机组无功分配层的任务是:在机组内以有功损耗最小为原则对无功参考值 Q_{giref} 在定子侧和网侧变流器间进行无功分配。

忽略转子摩擦损耗和变流器开关损耗,机组内部无功电流分量引起的有功损耗可以表示为^[6]:

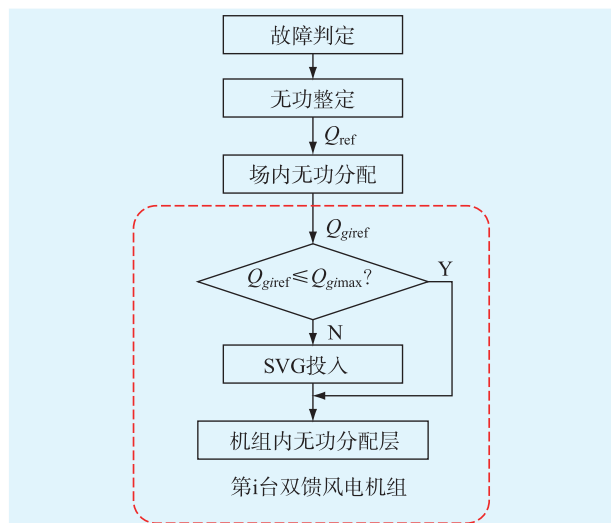


图1 场内无功分配控制方案

$$\Delta P_Q = i_{qs}^2 R_s + i_{qr}^2 R_r + i_{qg}^2 R_g \quad (16)$$

式中： R_s 、 R_r 、 R_g 分别为定子电阻、转子电阻和网侧变流器的滤波器电阻； i_{qs} 、 i_{qr} 、 i_{qg} 分别为定子电流、转子电流和网侧变流器的电流无功分量。

为了得到定子侧无功功率和转子侧无功功率的最佳分配,取定子侧无功电流分量 i_{qs} 、网侧无功电流分量 i_{qg} 为优化变量,且有:

$$Q_{giref} = Q_s + U_s i_{qg} \quad (17)$$

将 $i_{qr} = -\frac{U_s}{\omega_s \cdot X_m} - \frac{X_s}{X_m} i_{qs}$ 代入式(13)得机组内优化的目标函数为:

$$\min f_2 = \left(\frac{X_m^2 R_s + X_s^2 R_r}{X_m^2} \right) i_{qs}^2 + \frac{2U_s X_s R_r}{\omega_s X_m^2} i_{qr} + R_g i_{qg}^2 + \frac{U_s^2 R_r}{\omega_s^2 X_m^2} \quad (18)$$

式中： U_s 为定子端电压； ω_s 为定子电流角频率。

无功约束条件为:

$$\begin{cases} i_{qs, \min} \leq i_{qs} \leq i_{qs, \max} \\ -i_{qg, \max} \leq i_{qg} \leq i_{qg, \max} \end{cases} \quad (19)$$

为尽量减小有功损耗,应满足:

$$i_{qg} \cdot i_{qs} > 0 \quad (20)$$

以式(19)、(20)作为不等式约束,式(17)作为等式约束求解目标函数(18)的优化问题,可以得出使 ΔP_Q 最小的 i_{qg} 和 i_{qs} ;定子侧无功功率给定值 $Q_{siref} = Q_s = i_{qs} U_s$;网侧变流器无功功率给定值 $Q_{rref} = i_{qg} U_s$ 。

2.3 双层无功分配控制方案

风电场由若干双馈风电机组、变压器和无功补偿设备及集电线路组成,其中,每台风电机组及其无功补偿设备均参与场内无功分配优化,构成场内

无功分配层,通过风场控制系统按照以网损最小为目标进行第一层的无功分配;同时,双馈风力发电机组在实现最大风能捕捉的条件下仍具备无功的独立调节能力,机组控制系统根据第一层分配后的每台机组的无功功率参考值以机组内部有功损耗最小为目标,在各个机组内部定子侧和网侧变流器之间进行第二层无功分配。整体控制方案如图2所示。

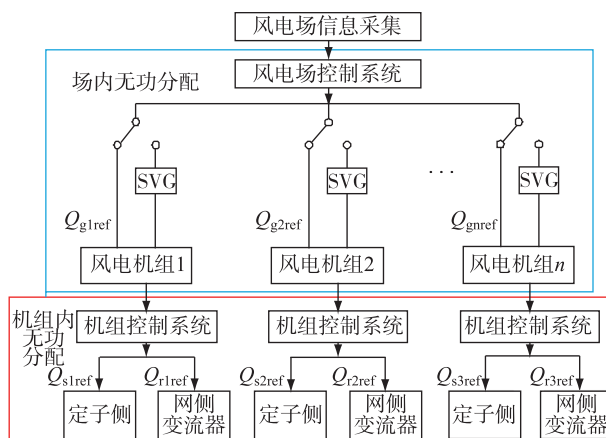


图2 双层无功分配整体控制方案

3 算例仿真

基于 Matlab/Simulink 平台建立 3 MW 双馈型风电场仿真模型,如下图3所示;该风电场模型中,含有3台双馈风电机组,额定容量为1 MW,额定电压为 575 V/60 Hz,定子电阻和漏抗分别为 0.027 06 p.u., 0.171 p.u., 转子电阻和漏抗分别为 0.005 p.u., 0.156 p.u., 变流器最大功率为 0.5 p.u., 2 台风电机组经升压变压器升压后再经长度为 10 km 架空线路接到 110 kV 升压变,最终经一条 20 km 的线路接入电网,同时在 575 V 母线侧均设有 500 kW 的静态无功补偿器(SVG)。仿真中,风速为恒定风速,设为 10 m/s。为观察电压稳定性,在 2 s 时刻,增加 500 kW 负荷引起电压波动,仿真结果如图4所示。

由图4可以看出,在 2 s 时,通过增加 500 kW 的负荷,造成了电网电压幅值的下降,在不考虑双馈风电机组的无功调节能力的情况下,电压下降的幅值最大,下降至母线电压的 97%,并且一直保持在该电压水平;在给风电机组分配了 0.1 p.u. 无功参考值之后,电压下降幅度明显减小,并且具备一定的电压恢复能力,在 1.5 s 后电压上升至母线电压的 98.5% 并保持恒定;图(c)为采用了文中的双层无功分配策略之后的电网电压跌落曲线,由图可知,风电场母线电压恢复至母线电压的 99% 以上,证明此方案可以抑制电网电压的波动。

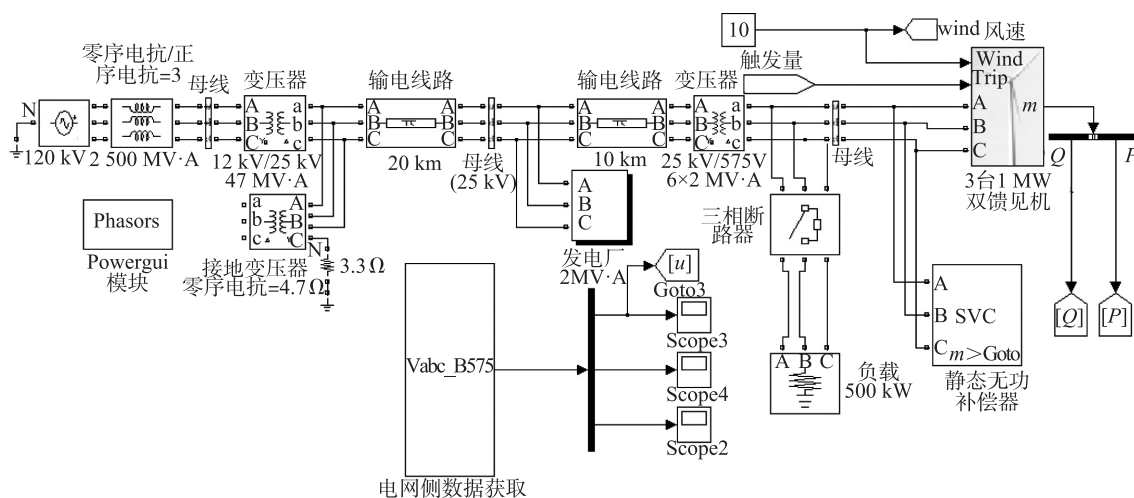
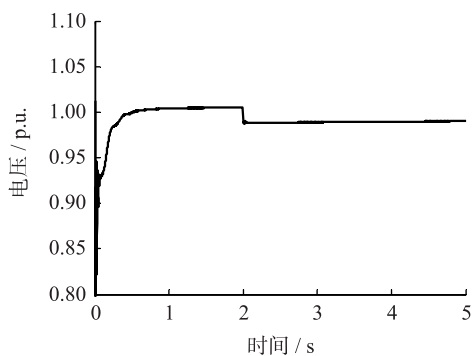
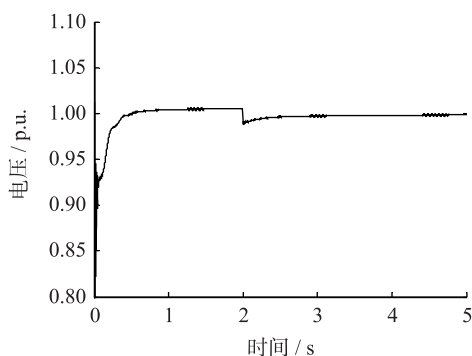


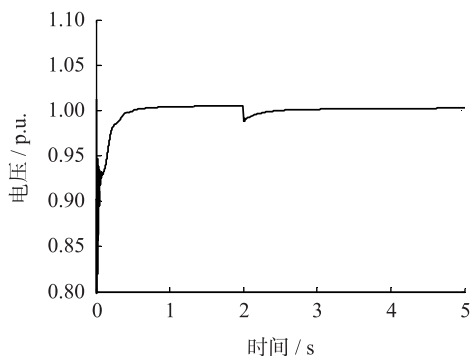
图3 双馈型风电场仿真模型



(a) 未考虑风电机组无功调节能力



(b) 风电机组无功出力参考值为0.1 p.u.



(c) SVG参与风电场无功分配

图4 电网电压波动仿真结果

图5为相同的风电场模型下,采用了双层无功

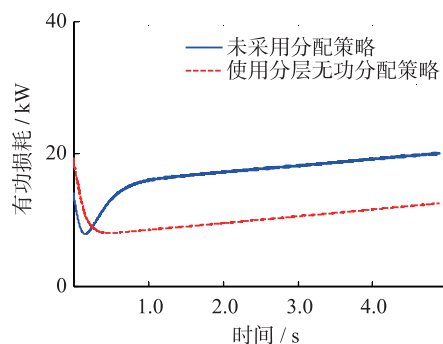


图5 3 MW 风电场实时有功损耗对比

分配策略和未采用该策略时的实时有功损耗曲线,该曲线由实时测量的数据计算得来,由图可知,无功双层分配之后,有功损耗明显降低,在风速一定的条件下提高了风电场的发电量,提升了发电效率。

4 结束语

考虑双馈风电机组定子侧和网侧无功功率具有相互独立的调节能力,从减小风电场有功损耗的角度出发,提出无功双层分配策略。在第一层分配中,以风电场有功网损最小为目标,充分利用风电场中各个机组的无功出力能力,根据电网的需求对无功进行分配;在第二层分配中,考虑定子侧、网侧变流器的无功极限,以机组内部有功损耗最小为目标,对各台风电机组内无功进行最优分配。仿真结果表明,与按无功容量比例分配相比,双馈风电机组的双层分配策略可有效减小风电场内有功功率损耗,提高风能利用率,提升风电场的发电效率;同时抑制了电压波动,增强了电网可靠性。

参考文献:

- [1] 符杨,陈宁,黄玲玲. 基于DFIG的大型风电场分层无功分配控制策略[J]. 华东电力,2011,39(5): 812-817.

- [2] 王 帅. 基于改进人工鱼群遗传混合算法的多目标风电场无功优化研究[D]. 河北农业大学, 2015.
- [3] 贾俊川, 刘 晋, 张一工. 双馈风力发电系统的新型无功优化控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(30): 87-92.
- [4] 杨俊友, 崔 嘉, 田艳丰, 等. 计及网损最小的含分散式风电场配电网多目标优化策略[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2141-2147.
- [5] 刘皓明, 唐俏俏, 朱凌志, 等. 双馈型风电场参与电压无功调节的分层控制方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 79-85.
- [6] 栗 然, 唐 凡, 刘英培, 等. 双馈式风电场改进的恒电压控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 79-85.
- [7] 郎永强, 张学广, 徐殿国, 等. 双馈电机风电场无功功率分析及控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 77-82.
- [8] 刘志武, 苑 舜, 邢作霞, 等. 基于最小网损的风电场无功优化分配策略[J]. 可再生能源, 2015, 33(5): 700-706.
- [9] 许大卫, 陈天华, 陈建华, 等. 地区电网与新能源无功电压协调控制[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(2): 41-44.

作者简介:



张 文

张 文(1968—), 男, 高级工程师, 从事新能源智能控制研究与应用工作;

阙 波(196—), 男, 高级工程师, 从事电力生产、安全监管、运行维护、调度控制等方面工作;

韦古强(1986—), 男, 助理工程师, 从事科技环保管理工作;

刘卫东(1967—), 男, 高级工程师, 从事新能源电气一次二次设备选型及相关技术优化运用工作;

陈光明(1979—), 男, 工程师, 从事新能源领域政策研究及控制技术应用工作。

Hierarchical Distribution Strategy of Reactive Power for DFIG Wind Farm

ZHANG Wen¹, QUE Bo², WEI Guqiang³, LIU Weidong¹, CHEN Guangming¹

(1. Ducheng Green Energy Co. Ltd., Beijing 100020, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, China;

3. Luneng Group Co. Ltd., Beijing 100020, China)

Abstract: Considering the problem that efficiency of wind generation is generally low, a hierarchical distribution strategy of reactive power for DFIG wind farm is put forward to reduce the power loss of both wind turbine and wind farm. To improve the efficiency of wind generation, the new strategy considers the stator and grid-side converters' power limitation based on the traditional reactive power distribution strategy and realizes the optimal distribution with the aim of least power loss. A simulation model of DFIG wind farm is built on MATLAB/Simulink platform. The results prove that the strategy can greatly reduce the power loss of wind turbine, improve the efficiency of wind generation and suppress voltage fluctuation caused by load changes, improving power quality.

Key words: DFIG wind farm; power limitation; hierarchical distribution of reactive power; power loss; generation efficiency

(上接第 73 页)

- [16] LI W, MONTI A, PONCI F. Fault Detection and Classification in Medium Voltage DC Shipboard Power Systems With Wave-lets and Artificial Neural Networks [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2014, 63(11): 2651-2665.
- [17] LIVANI H, EVRENOSOĞLU C Y. A Fault Classification and Localization Method for Three-Terminal Circuits Using Machine Learning[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2282-2290.

作者简介:



李 岩

李 岩(1990—), 男, 辽宁海城人, 博士, 研究方向为柔性直流输电的保护与控制;

龚雁峰(1977—), 男, 江苏启东人, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制;

姜 斌(1990—), 男, 江苏扬州人, 博士, 研究方向为柔性直流输电的保护与控制。

A Protection Scheme for Multiterminal VSC-HVDC System Based on Direction Traveling Waves

LI Yan, GONG Yanfeng, JIANG Bin

(North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: A protection scheme based on the ratio of energies of direction traveling waves is presented in this paper. Firstly, the propagation characteristic of fault traveling waves in a star-connected VSC-HVDC system is analyzed, and the different propagation law between fault and non-fault lines is studied. Then modal voltage and current are transformed in discrete wavelet transform(DWT), and wavelet energies of direction traveling waves are calculated. Finally, the fault line is determined by the ratio of positive and negative direction traveling waves. Simulation results of PSCAD/EMTDC show that the proposed method can identify the fault line quickly in the star-connected VSC-HVDC system. The proposed method is insensitive to different fault lines, fault distance, fault types and fault resistance, and has good robustness.

Key words: VSC-HVDC; star-connected; direction traveling waves; discrete wavelet transform; wavelet energy