

## 一种基于方向行波的多端 VSC-HVDC 系统保护策略

李 岩, 龚雁峰, 姜 斌  
(华北电力大学, 北京 102206)

**摘 要:** 针对星型连接的多端柔性直流输电(VSC-HVDC)系统, 提出一种基于方向行波小波能量比值的保护策略。首先分析了星型连接 VSC-HVDC 系统故障行波的传播特性, 找出故障线路和非故障线路方向行波的不同传播规律; 然后对电压和电流量分量进行离散小波变换, 计算相应线路方向行波的小波能量; 最后通过各个线路正反向行波小波能量的比值确定故障线路。PSCAD/EMTDC 仿真结果表明: 提出的方法能够快速准确地判断星型拓扑 VSC-HVDC 系统的故障线路, 并且不受故障线路、故障距离、故障类型和故障电阻的影响, 具有很好的鲁棒性。

**关键词:** VSC-HVDC; 星型拓扑; 方向行波; 离散小波变换; 小波能量

**中图分类号:** TM315

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2017)01-0070-04

基于电压源型的多端柔性直流输电技术(multi-terminal VSC-HVDC)在风电场并网、孤岛供电和城市电网供电等诸多领域具有非常广阔的应用前景<sup>[1-5]</sup>。多端直流输电系统通过采用环网或者星型的拓扑结构进行连接, 由于换流站的控制方式和连接结构的灵活性, 给系统保护策略的整定带来了极大的困难<sup>[6]</sup>。对于现有的多端直流输电工程, 通常采用双极电缆的传输方式, 故障类型多为永久性故障。当直流线路发生短路故障, 短路电流将会传导至所有相连换流站, 给系统的安全稳定运行带来巨大的挑战。因此, 对于多端直流输电系统, 当直流线路发生短路故障时应能够及时准确地确定故障线路并予以切除。

行波保护因其响应时间快, 受故障电阻和故障位置影响小等优点, 已经广泛作为直流线路的主保护, 应用于多端直流系统中<sup>[7-12]</sup>。文献[13]针对环网结构的 VSC-HVDC 系统, 根据边界行波的传播特点, 提出一种边界保护的策略。文献[14]则针对星型连接的多端 VSC-HVDC, 基于同步测量装置捕捉各个端点行波到达时刻, 实现对故障线路的判别和故障定位。文献[15]则通过行波和模糊算法实现对多端柔直系统故障线路的确定。本文针对星型连接的 VSC-HVDC 输电系统, 提出一种基于方向行波小波能量比值的保护策略。

### 1 小波理论

#### 1.1 小波变换

小波变换作为新型数字信号处理工具, 最大的特点就是具有良好的时频局部化能力, 能够同时从

时域和频域描述奇异信号的每一个细节。故障产生的行波是一种非平稳变化的高频信号, 因此小波变换成为分析行波最为有效的数学工具之一<sup>[16]</sup>。

一维连续小波变换的定义如下: 具有有限能量的信号(函数) $f(t)$ 的小波变换是把母小波函数 $\psi(t)$ 作位移 $b$ 后, 再在不同尺度因子 $a$ 下与待分析信号 $f(t)$ 作内积, 公式如式(1)所示:

$$WT_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

连续小波变换(CWT)能有效避免信息丢失, 但也导致了信息冗余, 因此工程领域更常采用离散小波变换(DWT)进行分析计算。离散小波变换不仅能降低连续小波的冗余度, 也能较好地保持连续小波变换的紧支性、光滑性和对称性, 具有很好的工程应用效果。二进制离散小波变换的定义如下:

$$WT_f(j, k) = 2^{-j/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* (2^{-j}t - k) dt \quad (2)$$

可以看出, 离散小波变换只是对连续小波函数的尺度因子进行了二进制离散化处理, 而保持时移因子的时间连续性, 本文在处理行波信号时均采用离散小波变换。

#### 1.2 小波能量

由小波理论可知, 信号奇异点的时刻和大小可以通过小波变换局部极大值(即模极大值)的时刻和大小来描述。小波变换的模极大值点与信号突变点是一一对应的, 模极大值与信号突变量的大小成正比。因此, 可以通过小波变换模值的能量函数来描述信号的奇异性。信号在尺度 $J$ 下的小波能量的定义如下<sup>[17]</sup>:

$$E_{\text{signal}} = \sum_{i=1}^M |d_{ji}|^2 \quad (3)$$

收稿日期: 2016-10-24; 修回日期: 2016-11-25

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGZJ0000BGJS1500265)

其中,  $d_{ji}$  表示在尺度  $J$  下离散小波变换的细节系数 (即模值),  $M$  表示采样周期内采样点的个数。

## 2 保护原理

### 2.1 故障行波基本理论

如图 1 所示, 当输电线路某处发生短路故障, 由叠加理论可知, 相当于在故障点附加一个大小相等方向相反的电压源, 产生的行波从故障点开始沿线路向两侧传播, 并在波阻抗不连续处发生折反射。

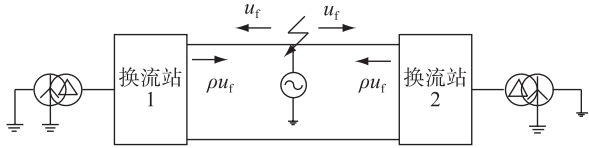


图 1 直流线路故障分量

对于线路上距离故障点为  $x$  的任一点, 可得该点的暂态电压  $\Delta u$  和暂态电流  $\Delta i$  分别为:

$$\Delta u = u^+ \left( t - \frac{x}{v} \right) + u^- \left( t + \frac{x}{v} \right) \quad (4)$$

$$\Delta i = \frac{1}{Z_c} \left[ u^+ \left( t - \frac{x}{v} \right) - u^- \left( t + \frac{x}{v} \right) \right] \quad (5)$$

式中:  $v = 1/\sqrt{LC}$  为行波的传播速度;  $Z_c = 1/\sqrt{L/C}$  为线路的波阻抗;  $L$  和  $C$  为单位长度线路的电感和电容;  $u^+$  和  $u^-$  分别为沿  $x$  正方向传播的前行波和沿  $x$  反方向传播的反行波 (定义母线指向线路为行波的正方向)。

由式(4)和(5)可以得到正向行波和反向行波的表达式分别为:

$$u^+ = (\Delta u + z_c \Delta i) / 2 \quad (6)$$

$$u^- = (\Delta u - z_c \Delta i) / 2 \quad (7)$$

行波在传播过程中, 遇到波阻抗不连续点会发生折射和反射现象, 且折射系数  $\rho$  和反射系数  $\gamma$  均满足  $|\rho| < 1$  和  $|\gamma| < 2$ 。

### 2.2 正反向行波的特性分析

考虑如图 2 所示星型连接的 VSC-HVDC 输电系统, 0 代表星型节点, 线路  $l_{01}$ ,  $l_{02}$  和  $l_{03}$  分别装有相应的保护装置。假设线路  $l_{03}$  发生正极接地故障, 其行波传播路径如图 2 所示。

其中:  $u_f$  为初始故障行波;  $u_{f1}$  和  $u_{f2}$  分别为线路  $l_{01}$  和  $l_{02}$  的折射波;  $\rho_{10}$ ,  $\rho_{20}$  和  $\rho_{03}$  分别为阻抗不连续处的反射系数;  $\gamma_{01}$ ,  $\gamma_{02}$  和  $\gamma_{03}$  分别为阻抗不连续处的折射系数。由波的折反特性可以知, 反射系数  $|\rho| < 1$ , 因此存在:

$$\begin{cases} |\gamma_{01} u_{f1}| > |\rho_{10} \gamma_{01} u_{f1}| \\ |\gamma_{02} u_{f2}| > |\rho_{20} \gamma_{02} u_{f2}| \\ |u_f| > |\rho_{03} u_f| \end{cases} \quad (8)$$

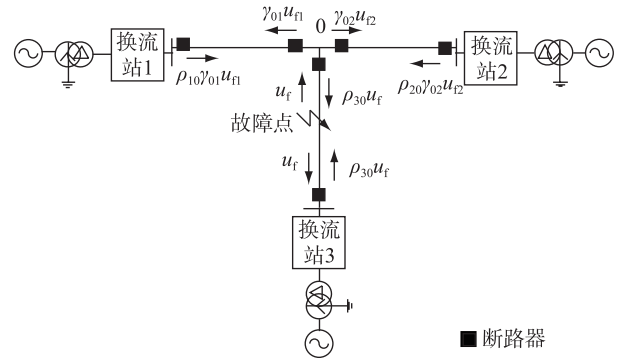


图 2 星型连接的 VSC-HVDC 输电系统

通过图 2 和式(8)可以发现, 对于故障线路而言, 星型节点所检测到的行波首先是来自故障点的反向行波, 而正向行波是该点的反射波, 由于反射系数  $|\rho| < 1$ , 所以故障线路反行波的幅值大于前行波, 其相应的反行波小波能量大于前行波。而非故障线路的方向行波传播特性则与故障线路相反, 前行波来自于星型节点的折射波, 而反行波则是该折射波在对端终点的反射波, 所以非故障线路的前行波幅值要大于反行波, 相应地前行波的小波能量也就大于反行波。

### 2.3 基于方向行波小波能量的保护策略

针对图 2 所示的星型连接的多端 VSC-HVDC 输电系统, 将采样装置设置在星型节点处, 这样可以同时检测 3 条线路的行波变化, 并能够采用统一的启动判据标准, 减小行波在电路上衰减所带来的影响。将相电压和电流解耦成模量进行分析, 因为线模分量相对稳定, 所以一般采用电压和电流的线模分量进行分析。基于方向行波小波能量的保护策略如下:

(1) 启动判据。对线模电流采用离散小波变换, 设定合适的阈值, 当小波变换的模值大于所设定的阈值时, 启动方向行波小波能量的积分判据, 对于噪声信号的干扰, 可以采用多层小波变换来排除。

(2) 方向行波小波能量计算。将直流线路采样得到的电压和电流进行相模转换, 得到相应线路的线模电压  $u_{mi}$  和电流  $i_{mi}$ , 模量分解矩阵如下所示:

$$T = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

采用式(6)、(7)分别计算线路  $l_{01}$ ,  $l_{02}$  和  $l_{03}$  的正向行波  $f_{mi}$  ( $i=1, 2, 3$ ) 和反向行波  $b_{mi}$  ( $i=1, 2, 3$ ), 选定合适的时窗  $\tau$  对  $f_{mi}$  和  $b_{mi}$  进行离散小波变换, 并按照式(3)计算相应的小波能量  $Ef_{mi}$  ( $i=1, 2, 3$ ) 和  $Eb_{mi}$  ( $i=1, 2, 3$ )。

(3) 方向行波小波能量判据。根据方向行波小波能量的比值可以快速检测出故障线路, 条件如表

1 所示。

表 1 方向行波小波能量判据

故障线路	方向行波小波能量判据		
线路 $l_{01}$	$Ef_{m1}/Eb_{m1} < 1$	$Ef_{m2}/Eb_{m2} > 1$	$Ef_{m3}/Eb_{m3} > 1$
线路 $l_{02}$	$Ef_{m1}/Eb_{m1} > 1$	$Ef_{m2}/Eb_{m2} < 1$	$Ef_{m3}/Eb_{m3} > 1$
线路 $l_{03}$	$Ef_{m1}/Eb_{m1} > 1$	$Ef_{m2}/Eb_{m2} > 1$	$Ef_{m3}/Eb_{m3} < 1$

### 3 算例分析

以 PSCAD/EMTDC 为仿真平台,搭建如图 2 所示的仿真模型。线路长度分别设置为  $l_{01} = 100$  km,  $l_{02} = 100$  km 和  $l_{03} = 100$  km。采样装置设置在星型节点处,采样频率设置为 200 kHz。采用 db 4 母小波进行离散小波变换<sup>[16]</sup>。

#### 3.1 典型故障分析

在线路  $l_{03}$  设置正极接地故障,故障电阻设置为  $10 \Omega$ ,故障距离换流站 3 为 30 km,故障开始时间为 2 s,小波能量计算时窗为 2 ms。

(1) 启动判据。以线模电流作为启动判据,线路  $l_{03}$  线模电流的 3 层小波变换模值如图 3 所示。通过图 3 可以看出,小波变换的模值随着尺度的增加而变大,因此判断线路发生短路故障而非噪声信号。

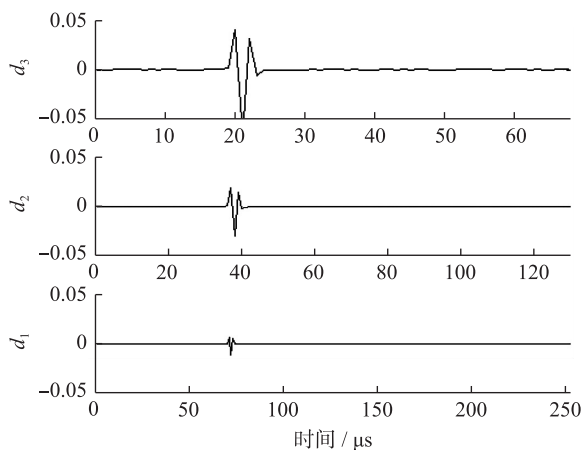


图 3 故障电流的三层小波变换模值

(2) 方向行波小波能量计算。采用式(9)对采集的电压和电流进行模量空间转换,分别得到  $u_{mi}$  ( $i=1,2,3$ ) 和  $i_{mi}$  ( $i=1,2,3$ )。然后根据式(6)、(7)分别计算得到线路  $l_{01}$ ,  $l_{02}$  和  $l_{03}$  的方向行波,如图 4 所示。最后根据式(3)分别计算 3 条线路的小波能量,分别为  $Ef_{m1} = 112 \times 10^{-4}$ 、 $Ef_{m2} = 112 \times 10^{-4}$ 、 $Ef_{m3} = 61 \times 10^{-4}$  和  $Eb_{m1} = 2.76 \times 10^{-4}$ 、 $Eb_{m2} = 2.75 \times 10^{-4}$ 、 $Eb_{m1} = 280 \times 10^{-4}$ ,小波能量如图 5 所示,其中纵坐标表示小波变换模值的平方。

(3) 方向行波小波能量判据。根据小波能量结果计算方向行波的比值判据,可得  $Ef_{m1}/Eb_{m1} = 39.14$ ,  $Ef_{m2}/Eb_{m2} = 38.70$  和  $Ef_{m3}/Eb_{m3} = 0.219$ 。因

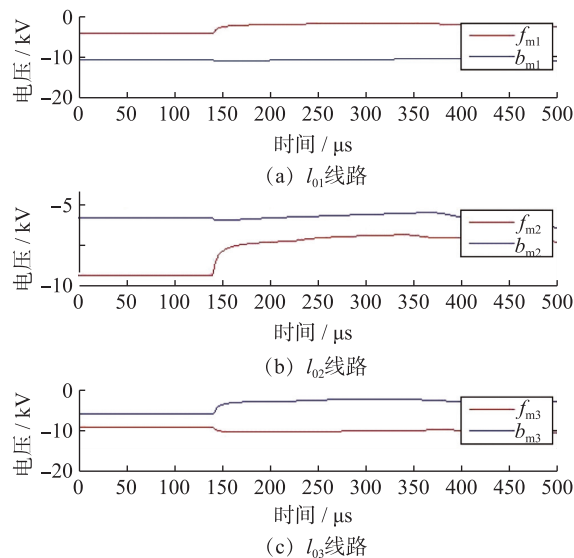


图 4 线路正向和反向行波

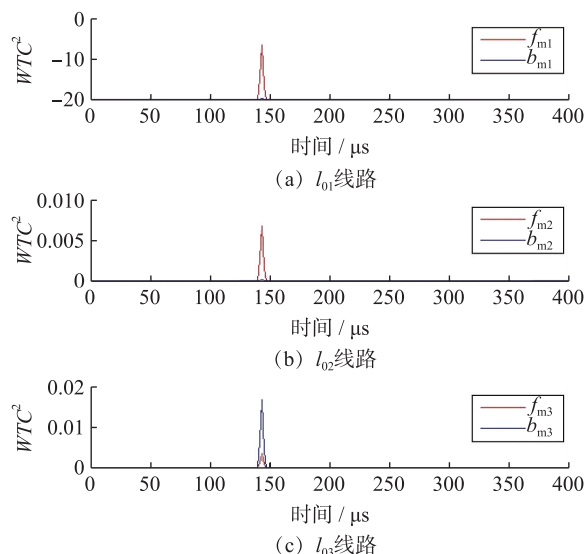


图 5 正向和反向行波小波能量

此,可以判断故障在线路  $l_{03}$  内,保护应快速动作予以切除。

#### 3.2 适应度分析

采用与上述仿真相同的参数设置,分别针对不同故障线路,故障类型、故障距离和故障电阻进行仿真分析。

##### 3.2.1 故障线路

分别在距离换流站 1、换流站 2 和换流站 3 的 30% 处设置正极接地故障,故障电阻设为  $10 \Omega$ ,计算结果如表 2 所示。结果表明,该算法能够在不同线路故障时有效地识别出故障线路。

表 2 不同故障线路

故障线路	仿真结果			故障线路
	$Ef_{m1}/Eb_{m1}$	$Ef_{m2}/Eb_{m2}$	$Ef_{m3}/Eb_{m3}$	
线路 $l_{01}$	39.78	38.91	0.218	$l_{01}$
线路 $l_{02}$	39.54	38.69	0.216	$l_{02}$
线路 $l_{03}$	39.14	38.70	0.219	$l_{03}$

### 3.2.2 故障类型

在线路  $l_{03}$  上设置短路故障,距离换流站 30 km,接地电阻为  $10 \Omega$ ,分别设置正极接地,负极接地和极间短路故障,计算结果如表 3 所示。从表 3 中可以看出,该算法不受故障类型的影响。

表 3 不同故障类型

故障类型	仿真结果			故障线路
	$E_{f_{m1}}/E_{b_{m1}}$	$E_{f_{m2}}/E_{b_{m2}}$	$E_{f_{m3}}/E_{b_{m3}}$	
正极接地	39.14	38.70	0.219	$l_{03}$
负极接地	39.14	38.70	0.216	$l_{03}$
极间短路	39.33	39.19	0.218	$l_{03}$

### 3.2.3 故障距离

在线路  $l_{03}$  上设置正极接地故障,距换流站 3 长度分别为线路的 10%, 30%, 50%, 70%, 90%, 计算结果如表 4 所示。从表 4 中可以看出,该算法不受故障距离的影响。

表 4 不同故障距离

故障距离/km	仿真结果			故障线路
	$E_{f_{m1}}/E_{b_{m1}}$	$E_{f_{m2}}/E_{b_{m2}}$	$E_{f_{m3}}/E_{b_{m3}}$	
10	37.62	34.36	0.222	$l_{03}$
30	39.14	38.70	0.219	$l_{03}$
50	40.60	40.99	0.216	$l_{03}$
70	40.72	40.74	0.217	$l_{03}$
90	40.10	40.11	0.218	$l_{03}$

### 3.2.4 故障电阻

在线路  $l_{03}$  上设置正极接地故障,距离换流站 3 长度为线路的 30%,故障电阻依次设置为  $0.1 \Omega$ 、 $100 \Omega$  和  $300 \Omega$ ,计算结果如表 5 所示。从表 5 中可以看出,即使在高阻的情况下,该算法仍能够有效地识别出故障线路。

表 5 不同故障电阻

故障电阻/ $\Omega$	仿真结果			故障线路
	$E_{f_{m1}}/E_{b_{m1}}$	$E_{f_{m2}}/E_{b_{m2}}$	$E_{f_{m3}}/E_{b_{m3}}$	
0.1	39.33	39.17	0.219	$l_{03}$
10	39.14	38.70	0.219	$l_{03}$
100	38.58	38.07	0.219	$l_{03}$
300	36.38	36.68	0.219	$l_{03}$

## 4 结束语

针对星型连接的 VSC-HVDC 输电系统,提出了基于方向行波小波能量比值的保护策略。得到以下结论:(1) 通过方向行波的传播特性可以发现,对于故障线路,反向行波的幅值要大于正向行波,而非故障线路则相反;(2) 通过对方向行波采用离散小波变换和计算方向行波的小波能量比值的计算能够准确地确定故障线路;(3) 通过仿真得出,该算

法不受故障线路、故障距离、故障类型和故障电阻的影响,具有很好的鲁棒性。

### 参考文献:

- [1] 徐政,薛英林,张哲任.大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5051-5062.
- [2] 尹寿焱,翟毅,吴昊,等.基于柔性直流输电技术的分布式发电在城市电网中的应用[J].江苏电机工程,2013,32(4):9-12.
- [3] TANG L, OOI B T. Locating and Isolating DC Faults in Multi-Terminal DC Systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1877-1884.
- [4] 张广明,田炜.海上风电场 VSC-HVDC 并网不对称故障负序电流控制[J].江苏电机工程,2014,33(6):7-11.
- [5] 王志新,吴杰,徐烈,等.大型海上风电场并网 VSC-HVDC 变流器关键技术[J].中国电机工程学报,2013,33(19):14-26.
- [6] GOMIS-BELLMUNT O, LIANG J, EKANAYAKE J, et al. Topologies of Multiterminal HVDC-VSC Transmission for Large Offshore Wind Farms [J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(2): 271-281.
- [7] 李爱民,蔡泽祥,李晓华.直流线路行波传播特性的解析[J].中国电机工程学报,2010,30(25):94-100.
- [8] 束洪春,田鑫萃,董俊,等. $\pm 800$  kV 云广直流输电线路保护的仿真及分析[J].中国电机工程学报,2011,31(31):179-188.
- [9] SONG G B, CAI X L, GAO S P, et al. Natural Frequency Based Protection and Fault Location for VSC-HVDC Transmission Lines [C] // International Conference on Advanced Power System Automation and Protection. IEEE, 2011: 177-182.
- [10] 艾琳.高压直流输电线路行波保护的研究[D].北京:华北电力大学,2002.
- [11] 武骁,何正友,彭少博,等.基于行波固有频率的特高压直流输电线路纵联保护方法[J].电力系统保护与控制,2013(11):67-73.
- [12] 高杉,林圣,何正友.基于并联电容参数识别的 VSC-HVDC 输电线路纵联保护[J].电网技术,2015,39(7):2002-2009.
- [13] XU Y, SHI D F, YAN S B. Boundary Protection Strategy for the VSC-MTDC under DC Faults [J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 448-453: 2030-2035.
- [14] NANAYAKKARA O M K K, RAJAPAKSE A D, WACHAL R. Traveling-wave-based Line Fault Location in Star-Connected Multiterminal HVDC Systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2286-2294.
- [15] HOSSAM-ELDIN A, LOTFY A, ELGAMAL M. Combined Traveling Wave and Fuzzy Logic Based Fault Location in Multi-terminal HVDC Systems [C] // 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEEIC), Florence, 2016: 1-6.

(下转第 83 页)

- [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 Wen<sup>1</sup>, QUE Bo<sup>2</sup>, WEI Guqiang<sup>3</sup>, LIU Weidong<sup>1</sup>, CHEN Guangming<sup>1</sup>

(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