

环形直流微网短路故障分析及保护方法

王 毅, 于 明, 张丽荣

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 以环形风电直流微网为研究对象, 深入分析直流母线发生双极短路故障时电压源变流器(VSC)的故障特性, 并据此提出以电流差动保护为主保护、欠电压保护为后备保护的环形直流微网故障定位与保护方案。该方案通过检测直流线路的输入、输出电流及其差动电流来定位和隔离故障线路, 并配备欠电压后备保护以确保故障下直流微网系统的安全运行。基于 MATLAB/Simulink 对环形直流微网进行仿真研究以验证所提保护策略的可行性。仿真结果表明, 在线路发生双极短路故障时, 保护系统能够根据线路差动电流值做出快速响应, 从而实现了直流微网系统短路故障的定位和隔离。

关键词: 直流微网; 环形拓扑; 双极短路; 故障分析; 电流差动保护; 故障定位

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.02.002

0 引言

近年来, 随着社会进步和经济发展, 负荷密集区用电量不断加大, 直流负荷增长迅速, 分布式能源受到越来越多的关注。交流配电网面临着分布式新能源接入、负荷多样化、潮流均衡协调、电能质量要求提高等多方面的挑战。直流配电在减少变流器的数量和换流次数、提高能源转换效率、减小线路损耗、降低总投资成本、提高输送容量、方便新能源接入等方面均凸显出较强的优势, 拥有广阔的发展前景^[1-2]。在直流配电网中, 低压直流微网是其主要的组网方式之一^[3]。在微网中建立直流传输线连接各微电源、储能系统及交直流负荷形成的低压直流微网, 可降低系统电能损耗, 增强供电连续性和可靠性, 并且有利于各微电源间的优势互补与协调控制^[4]。

目前, 对直流微网的研究主要集中于稳定运行控制策略^[5-6], 但微网中的可控单元较多并且分散, 系统的拓扑结构直接决定了控制策略的实用性和可靠性, 对系统成本、故障切除难易程度、保护方案设计、功率损失等方面也有直接影响, 所以需深入探讨拓扑结构。此外, 为保证直流微网的安全稳定运行, 可靠的直流故障保护策略不可或缺。传统直流输电系统中, 直流侧串联较大的平波电抗器, 系统不易受故障所产生的过电流影响。且在直流故障发生后, 换流站闭锁, 待线路故障电流降为零后, 再切除线路。而直流微网系统中, 各微电源与负荷均经电压源变流器 VSC (Voltage Source Converter) 接入直流侧, 交流主网也通过 VSC 与直流微网系统连接。即使在微网发

生故障时, 网侧变流器(G-VSC)闭锁, 交流主网仍会经相应 VSC 的反并联二极管与直流侧形成通路, 向故障点馈入功率。同时, 其他 VSC 亦会向故障点释放功率, 造成变流器与直流线路过电流, 严重危及系统安全稳定运行。文献[7]采用交流断路器与直流隔离开关协调方式实现故障保护。但是, 交流断路器的响应时间较长, 系统从故障发生到切除需要较长时间, 而电力电子器件可能在极短的时间内损坏, 无法起到保护作用。J. D. Park 等人提出了基于探测功率的非迭代故障定位技术, 但需要在线路安装较为复杂的探测功率单元^[8]。

直流故障分为短路故障、接地故障以及断线故障等^[9-12]。本文以风电直流微网为例, 研究相应环形拓扑结构及其直流母线发生双极短路故障时的系统保护方案。首先, 对比分析了直流微网的环形拓扑结构相对辐射形结构的优越性; 然后分析了直流微网系统在发生直流线路短路故障时的暂态特性, 包括 VSC 的故障暂态过程, 提取电流故障特征, 在此基础上提出将电流差动保护作为主保护、欠电压保护作为后备保护的方案, 以快速准确地检测与隔离故障线路、合理开断直流断路器; 最后, 为验证所提保护方案对直流微网系统的有效作用, 基于 MATLAB/Simulink 建立风电直流微网的环形拓扑系统模型, 并对直流短路故障进行仿真研究。

1 风电直流微网系统拓扑结构

风电直流微网的拓扑结构主要有辐射形和环形 2 种, 如图 1 所示。

辐射形拓扑又称放射形或树状拓扑, 是直流微网中最基本的拓扑结构。如图 1(a)所示, 在辐射形拓扑结构中, 系统各单元经直流传输线汇流于中心母线。每条直流传输线仅需配置一个直流断路器, 系统结构

收稿日期: 2015-12-17; 修回日期: 2016-10-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2015-AA050101)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2015AA-050101)

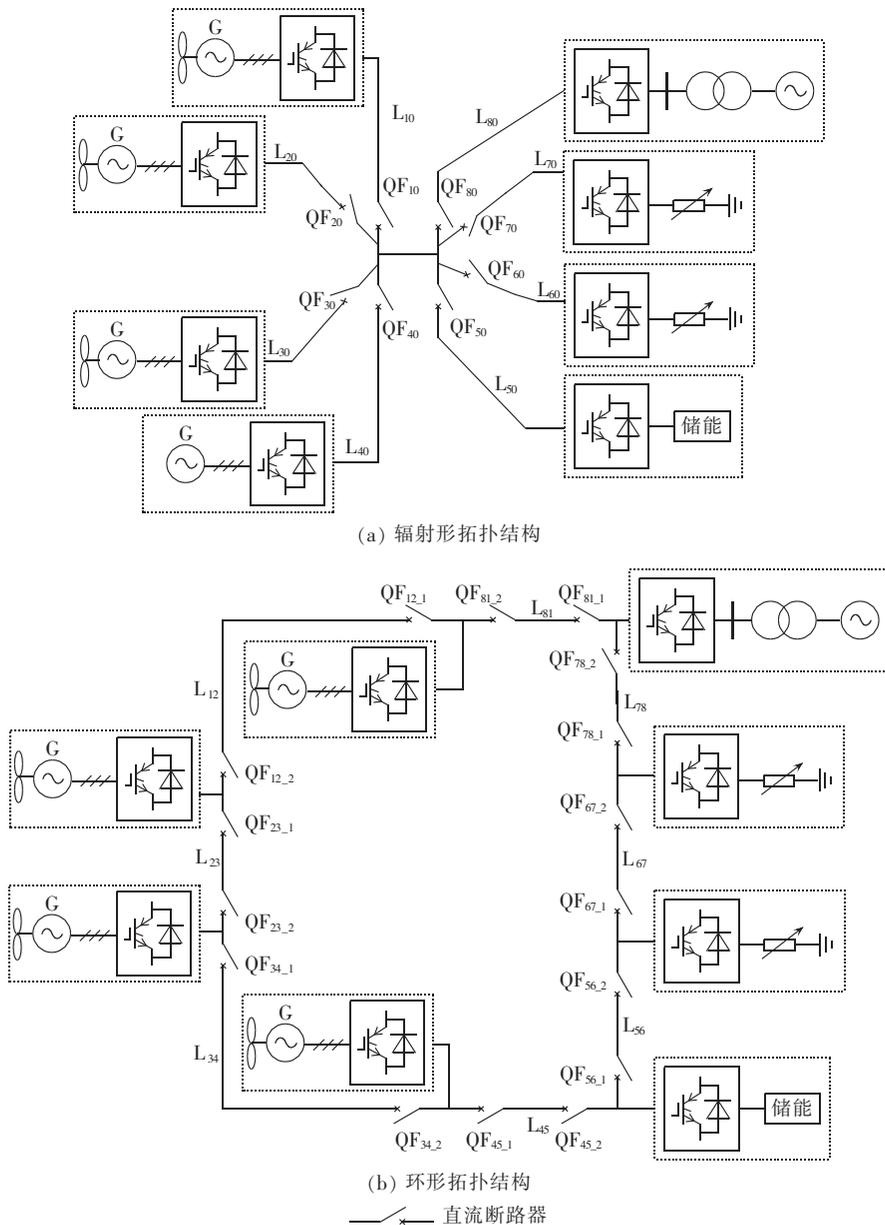


图 1 风电直流微网的辐射形及环形拓扑结构

Fig.1 Radial and looped topologies of DC microgrid with wind turbines

简单,建设成本较低。然而,其缺点也显而易见,当中心汇流母线发生故障时,系统中所有直流传输线的断路器动作,各分布式电源失去仅有的功率输出通道,负荷也因此失电。因而,该拓扑可靠性及灵活性均较低。

如图 1(b)所示的环形结构直流微网系统,其所有直流端通过直流母线连接成环状。系统负荷可由双向线路供电,该冗余结构增加了系统的可靠性及故障或设备检修期间运行的灵活性。当直流线路发生故障时,故障线路两端的直流断路器断开,系统运行于开环模式,无功功率损失。虽然环形拓扑的直流母线的长度和容量以及断路器的使用数量有所增加,但是其比辐射形拓扑结构具有更高的供电可靠性及灵活性。因而环形拓扑结构更能发挥直流微网

的优点,是更为理想的组网方式。然而,环形网络上任意一点发生直流短路故障,其他单元的电电压、电流都会受到影响,而且各端的电压、电流故障特性差异不明显。所以,环形拓扑结构微网的故障保护也变得更为困难。在设计保护方案时,应先分析系统的短路故障特征。

2 直流双极短路故障特性

2.1 VSC 的直流故障特性

直流微网在发生双极短路故障时,直流电容通过故障点快速放电,交流系统电流被箝位至三相短路电流。此外,VSC 由于自身过电流保护被紧急闭锁,交流电流经续流二极管继续馈入故障点,其等效电路如图 2 所示。图中 R 、 L 分别为 VSC 至故障点的等

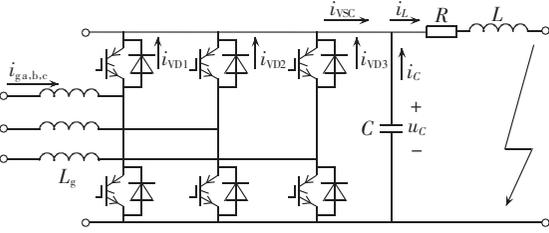


图 2 直流线路短路时 VSC 的等效电路
Fig.2 Equivalent circuit of VSC during DC-line short circuit fault

效电阻和电感, C 为相应直流侧及线路等效电容。可见, 直流母线双极短路时的等效电路为复杂的非线性电路, 可以将其响应分为 3 个阶段, 如图 3 所示。

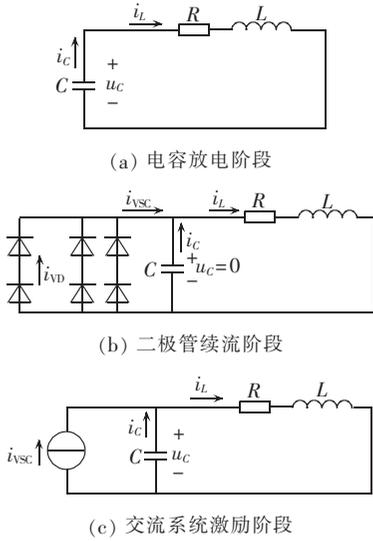


图 3 直流线路短路时 VSC 暂态响应的 3 个阶段
Fig.3 Three stages of VSC transient response during DC-line short circuit fault

2.1.1 电容放电阶段

线路发生双极短路故障瞬间, VSC 闭锁, 直流电容向故障点快速放电, 直流电压迅速下降至 0, 直流故障电流迅速上升。由于直流电容放电电流远大于交流侧续流, 故忽略交流电流, 此阶段直流电容、线路电阻与电感构成 RLC 二阶放电电路, 等效电路如图 3(a)所示。由基尔霍夫电压定律得:

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0 \quad (1)$$

其中, u_C 为直流电容电压。

考虑到两极线路发生金属性短路故障或故障电阻较小时, 电容放电为二阶欠阻尼振荡过程, 即 $R < 2\sqrt{L/C}$ 。

假设在 t_0 时刻, 直流线路发生双极短路故障, 其初始条件为 $u_C(t_0) = U_0, i_L(t_0) = I_0$ 。由于电路振荡放电, 由式(1)可得故障后直流侧电压及电流分别为:

$$u_C = \frac{U_0 \omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta) - \frac{I_0}{\omega C} e^{-\delta t} \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$i_L = C \frac{du_C}{dt} = -\frac{I_0 \omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t - \beta) + \frac{U_0}{\omega L} e^{-\delta t} \sin(\omega t) \quad (3)$$

其中, $\delta = R/(2L), \omega^2 = 1/(LC) - [R/(2L)]^2, \omega_0 = \sqrt{\delta^2 + \omega^2} = 1/\sqrt{LC}, \beta = \arctan(\omega/\delta)$ 。

由式(2)可求得, 当电容完全放电, 即 $u_C = 0$ 的时刻为:

$$t_1 = t_0 + \frac{\pi - \gamma}{\omega} \quad (4)$$

其中, $\gamma = \arctan[(U_0 \omega_0 C \sin \beta)/(U_0 \omega_0 C \cos \beta - I_0)]$ 。

将式(4)代入式(3)可得到:

$$i_L(t_1) = -\frac{I_0 \omega_0}{\omega} e^{-\delta(\pi - \gamma)/\omega} \sin(\pi - \gamma - \beta) + \frac{U_0}{\omega L} e^{-\delta(\pi - \gamma)/\omega} \sin \gamma \quad (5)$$

一般而言, 直流线路金属短路时, $[R/(2L)]^2$ 远小于 $1/(LC)$, 则可认为 $\omega_0 = \omega$, 短路电流 i_L 可进一步简化为:

$$i_L = e^{-\delta t} \left[U_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \sin(\omega t) + I_0 \cos(\omega t) \right] \quad (6)$$

令 $\theta = \arctan\left(\frac{I_0}{U_0} \sqrt{\frac{L}{C}}\right)$, 则式(6)进一步化简为:

$$i_L = e^{-[R/(2L)]t} \sqrt{\frac{C}{L} U_0^2 + I_0^2} \sin(\omega t + \theta) \quad (7)$$

由式(7)可知, 发生短路故障时初始电压 U_0 和电流 I_0 越大, 放电电流的峰值越高, 且故障电流主要受参数 L, C 的影响。电路参数与故障电流峰值的关系如图 4 所示, 当故障瞬间 VSC 初始电压 U_0 和初始电流 I_0 一定时, 故障电流峰值随系统并联电容的增加而升高, 但随回路电感的增大而降低。这主要因为在直流电压一定的前提下, 系统电容越大, 直流侧发生故障后电容经故障点释放的能量也越多, 电感存储的电磁能就越多, 电感电流(即短路故障电流峰值)就越大; 相反, 电感值越小, 储存同样能量所需电流就会越大。

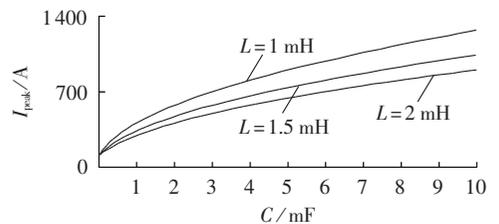


图 4 $U_0 = 400 \text{ V}, I_0 = 75 \text{ A}$ 时放电电流峰值与回路电感值和电容值的变化关系

Fig.4 Relationship between I_{peak} and C for different values of L , when $U_0 = 400 \text{ V}$ and $I_0 = 75 \text{ A}$

2.1.2 二极管续流阶段

二极管续流阶段从直流电容电压降为 0 开始到电容重新充电为止。当直流电容电压下降为 0 时, 电感放电, 故障电流经反并联二极管续流。此时的等效电路为一阶电路, 如图 3(b)所示。其电感电流按式(8)所示指数规律衰减。

$$i_L = I_0 e^{-(R/L)t} \quad (8)$$

其中, I_0 为初始电感电流 $i_L(t_1)$ 。续流二极管三相桥中每个桥臂承受 $1/3$ 的电感电流, 即:

$$i_{VD} = \frac{1}{3} i_L \quad (9)$$

该阶段对二极管过流能力要求较高, 因为在此期间, 具有较大初值的电感放电电流突然经反并联二极管续流, 若其过流能力较低, 故障冲击电流会将二极管瞬间损毁。因此, 开关器件的选取应充分考虑二极管过流能力。根据前述内容, 电容放电至 0 的时间及此时的电流值可分别简化为式(10)和式(11)。

$$t_1 = t_0 + \frac{\pi - \gamma}{\omega} = t_0 + \sqrt{LC} \left[\pi + \arctan \left(\frac{U_0}{I_0} \sqrt{\frac{C}{L}} \right) \right] \quad (10)$$

$$i_L(t_1) = e^{-(R/(2L))t_1} \sqrt{\frac{C}{L} U_0^2 + I_0^2} \sin(\pi - \gamma + \theta) \quad (11)$$

电容全部放电的时间与系统参数之间的关系如图 5 所示。由图 5 可以看出, 电容放电至 0 的时间(即二极管承受最大过电流而受损的时间)随着电容与电感值的增大而延长; 当系统参数一定时, 电容全部放电的时间由故障发生时刻的直流电压和电流值共同决定。

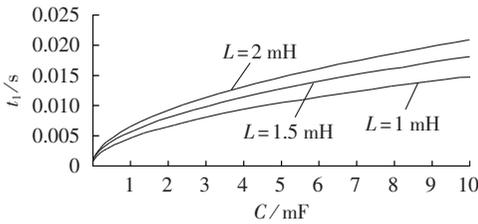


图 5 $U_0=400$ V, $I_0=75$ A 时电容放电时间与回路电感值和电容值的变化关系

Fig.5 Relationship between t_1 and C for different values of L , when $U_0=400$ V and $I_0=75$ A

此外, 需要说明的是, 该阶段二极管中流过的电流并非全部为电感放电电流。这主要是因为随着电容放电, 直流电压下降到一定程度时, 交流侧可经二极管向直流系统提供电流。因而, 此时二极管中流过的电流为电感放电电流与交流系统提供的电流之和。随着电感电流的衰减及交流故障电流的增加, 电容重新充电, 直流电压也随之上升。

2.1.3 交流系统激励阶段

在 VSC 闭锁后, 交流系统并未被隔离, 而是通过 VSC 的反并联二极管形成的三相桥式不控整流电路, 向直流侧输送功率。此时系统相当于三相不控整流器工作在直流侧短路状态, 等效电路如图 3(c) 所示。假设短路故障发生前的 a 相电流如式(12)所示。

$$i_{ga101} = I_{m101} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{101}) \quad (12)$$

其中, I_{m101} 为电网电流幅值; ω 为同步角频率; α 为 t_1 时刻 a 相相角; φ_{101} 为阻抗角。求得三相短路电流如

式(13)所示。

$$\begin{cases} i_{ga} = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + \\ \quad [I_{m101} \sin(\alpha - \varphi_{101}) - I_m \sin(\alpha - \varphi)] e^{-t/\tau} \\ i_{gb} = I_m \sin(\omega t + \alpha - 120^\circ - \varphi) + \\ \quad [I_{m101} \sin(\alpha - 120^\circ - \varphi_{101}) - \\ \quad I_m \sin(\alpha - 120^\circ - \varphi)] e^{-t/\tau} \\ i_{gc} = I_m \sin(\omega t + \alpha + 120^\circ - \varphi) + \\ \quad [I_{m101} \sin(\alpha + 120^\circ - \varphi_{101}) - \\ \quad I_m \sin(\alpha + 120^\circ - \varphi)] e^{-t/\tau} \end{cases} \quad (13)$$

其中, I_m 为短路电流周期分量的幅值; $\varphi = \arctan[\omega(L_g + L)/R]$ 为短路回路阻抗角, L_g 为 VSC 进线电感; $\tau = (L_g + L)/R$ 为短路回路时间常数。

由续流二极管构成的三相不控整流电路将交流侧短路电流中大于 0 的部分输送至直流侧。因此, VSC 直流侧短路电流如式(14)所示。

$$i_{VSC} = i_{VD1} + i_{VD2} + i_{VD3} = i_{ga(>0)} + i_{gb(>0)} + i_{gc(>0)} \quad (14)$$

由上述分析可知, 微网系统直流线路发生双极短路故障时, VSC 闭锁, 直流电容放电导致其电压下降, 当电容电压降为 0 时, 故障电流经反并联二极管续流, 此时为续流二极管最危险的时刻。保护系统的设计必须具有响应的快速性, 以确保在二极管续流阶段到来之前将故障切除, 避免续流二极管及整个 VSC 受损。

2.2 环形直流微网系统的直流线路短路故障特性

对于交流系统, 交流电压及电流一直以较大变化率进行周期性变化, 且通常采用具有大滤波电感的电流源型变流器, 因而发生故障时线路电流上升缓慢。相比于交流系统, 低压直流微网为小惯量系统, 采用大量电力电子变流器连接分布式微电源及负荷, 系统通过控制直流母线电压稳定来确保微网内部功率平衡。系统稳定运行时, 直流电压不会突变, 直流电流仅有小幅波动; 而发生短路故障时, 直流电压迅速下降且直流电流会快速产生大幅波动。

对于环形拓扑直流网络, 直流线路任意一点发生双极短路故障时, 各直流单元输出电压、电流均会受到影响。不仅故障线路两端单元向故障点馈入功率, 其他各直流端也经相应直流输电线路向故障点馈入功率, 且各端电压、电流故障特性相近。图 6 为环形微网直流线路发生双极短路故障时, 系统电流流向示意图。该系统包括交流主网、风电系统、储能系统及负荷 4 个子单元。稳态时, 各单元输出功率大小如图 6 所示。故障前, 系统处于联网变流器控制模式, 由交流主网维持直流系统功率平衡。图中标记了各条直流线路在故障前后首端及末端电流方向。由图可知, 线路 L_{13} 发生短路故障后, 其两端电流均流向故障点, 其他各单元也经相应线路向故障点输出电流。同理, 线路 L_{12} 、 L_{24} 及 L_{34} 短路时的电流流向

也可做类似分析。直流微网中变流器通常采用大电容滤波,无大电感时,故障电流上升迅速,其短路电流之大足可在短时内对系统造成严重损坏。因而,保护单元应能准确、快速地检测故障线路,并及时采取隔离措施。

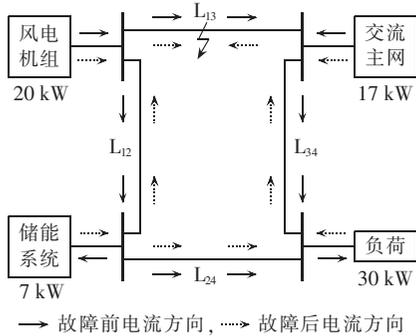


图 6 线路 L_{13} 发生双极短路故障时系统电流方向
Fig.6 Current directions when L_{13} has pole-to-pole short circuit fault

3 直流微网系统保护设计

根据上述分析可知,环形直流微网直流输电线路发生双极短路故障时,其直接表现为电流的突变,包括幅值和方向。相比于交流线路故障,直流线路故障特性更为直观明了。同时,其故障特性也要求系统具备更为准确、快速的故障定位及隔离措施。由于环形拓扑直流微网发生短路故障时,各端电压、电流特性相近,短路电流均会以较大幅值快速上升。因而,基于幅值特征的过电流保护与直流速断保护、电流增量保护、电流变化速率保护等均无法准确定位直流故障线路,对于直流微网不具有适用性^[13-14]。本文基于直流线路发生双极短路故障时的电流幅值和方向特性,提出了以电流差动保护作为主保护的直流系统保护策略。

电流差动保护可准确、快速地区分输电线路内部与外部短路故障,具有线路内部短路故障的绝对选择性,并被广泛应用于交流系统输电线路的保护中^[15-16]。鉴于直流微网通常采用较短的输电线路,信号传输通道也较短,可忽略线路两端电流同步问题对差动保护动作特性的不利影响。除功率调整期间线路两端电流出现短时不一致外,系统稳态运行时,其两侧电流均表现为稳定的直流量^[17]。此外,在直流微网中,由于较短的输电线路、较小的分布电容电流,以及来自于直流分压器与分压器的保护系统采样电流与电压,决定了系统保护性能不易受到互感器饱和、线路分布电容及系统振荡等因素的影响,因而可靠性及准确性更高。

根据第 2 节分析的故障电流大小和方向的变化特性,借鉴纵联电流差动保护的原理,将其应用于直流微网系统的直流线路短路故障保护。如图 7 所示,

直流微网系统线路电流差动保护的原理如下:规定由各端母线指向被保护直流线路为电流的正方向,检测被保护线路两端的电流矢量,将其和的绝对值与保护设定阈值做对比,若大于设定阈值则可判定该线路内部区域发生故障,保护控制器向故障线路两端断路器发出跳闸指令,断路器断开,故障线路被切除;同时,故障电流吸收电路中二极管 V_{Dex} 导通,为故障电流提供续流通道,并由电阻 R_{ex} 消纳,避免故障电流产生较大的线路应力。直流线路中电流差动保护判据为:

$$I_{diff} = |I_{L_in} + I_{L_out}| > I_{set} \quad (15)$$

其中, I_{L_in} 与 I_{L_out} 为线路两端电流矢量; I_{diff} 为相应差动电流; I_{set} 为保护设定阈值,其整定依据主要为电力电子器件的过载能力。

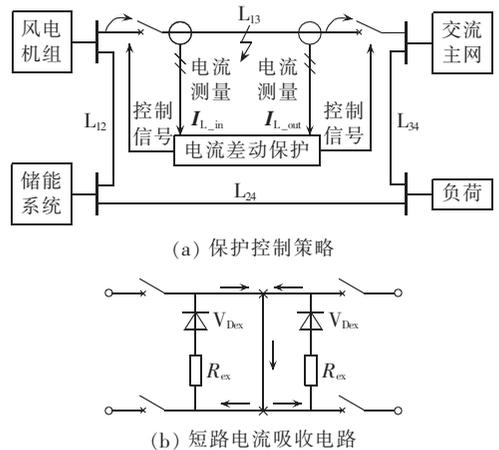


图 7 直流线路发生短路故障时的电流差动保护策略示意图

Fig.7 Schematic diagram of current differential protection strategy during DC-line short circuit fault

在上文所述正方向下,系统正常运行时,输电线路两端电流等值反向,差动电流为零。当线路发生短路故障时,故障线路两端电流迅速增大,且均由各自母线端馈入故障点,因而在规定正方向下两端电流变为同向,差动电流突增。在保护控制系统作用下,直流断路器可在 1 ms 内断开以切除故障线路,并防止各单元故障电流到达过流值,从而避免系统电力电子设备损毁,对线路和二极管等起到了保护作用。该方法依靠被保护线路差动电流值来隔离故障线路,具有速动性及可靠性,因而增加了其实用价值。

当直流微网发生线路双极短路故障瞬间,除电流显著变化外,电压也迅速降低。当电流差动保护拒动时,为保护二极管免受损坏,需要配备后备保护。本文将直流母线短路时直流电压迅速下降这一故障特征作为后备保护判据(即欠电压保护)。具体保护策略为:当各端直流电压低于设定阈值,且经预设延时后仍未恢复至正常范围时,保护控制器向断路器发出动作指令,故障线路被快速切除。欠电压动作

阈值的设定主要依据直流电压允许下限。延时设定应小于二极管承受过流受损时间 t_1 。当电流差动主保护拒动时,欠电压保护作为后备保护,可有效防止短路峰值电流对系统中电力电子器件的破坏。

4 仿真分析

4.1 仿真系统简介

为验证本文提出的电流差动保护为主保护、欠电压保护为后备保护的直流微网线路保护策略的有效性,基于 MATLAB/Simulink 建立了如图 8 所示的环形直流微网系统模型。系统控制采用文献[5]中电压分层下垂控制方法。直流变量 U_{dc_WT} 和 I_{dc_WT} 、 U_{dc_B} 和 I_{dc_B} 、 U_{dc_G} 和 I_{dc_G} 及 U_{dc_L} 和 I_{dc_L} 分别为风电变流器(W-VSC)、储能变流器(Bi-DC)、G-VSC 及负荷变流器(L-VSC)侧直流电压和电流。系统参数如下:直流线路额定功率为 60 kW,额定电压为 400 V, π 型等效电路,线路长度为 0.4 km, $R_1=0.0139 \Omega/\text{km}$; $L_1=0.159 \text{ mH}/\text{km}$, $C_1=0.231 \mu\text{F}/\text{km}$, $C=50 \text{ mF}$; 2 台 30 kW/220 V 永磁风电机组的额定风速为 12 m/s,额定转速为 75 r/min, W-VSC 的额定功率为 60 kW; G-VSC 额定功率为 30 kW; Bi-DC 额定功率为 30 kW,铅酸蓄电池参数为 120V/100A·h; 负荷为 30 kW; 吸收电路电阻 R_{ex} 为 2 Ω 。仿真时,风电系统视作等值机组。仿真 1.5 s 时直流线路 L_{13} 发生双极短路故障。以下分别为直流微网发生短路故障时不采用保护措施、采用电流差动保护及采用欠电压后备保护时的运行特性对比仿真结果。

4.2 无保护作用时系统运行特性

仿真初始时刻,负荷功率为 30 kW,蓄电池处于充电状态,风电机组及交流主网分别通过各自变流器向系统输出相应功率,系统稳定运行。仿真 1.5 s 时,线路 L_{13} 发生双极短路故障,如图 9 所示,联网变流器直流侧电容放电,其电压经过 42 ms 后降为 0,此时短路故障电流达到 910 A,为稳态电流值的 22.8 倍。此刻若电感放电电流经二极管进行续流,可在瞬间将其损毁。图 10 为故障前后联网变流器交流

侧电流特性,由图可知,发生直流短路故障后交流侧三相电流较故障前变化显著。图 11 为故障前后各条直流线路两端电流,由图可知,故障发生前各输电线路两端电流等值反向,故障发生后各端电流突增并馈入故障点,在规定正方向下线路 L_{13} 两端电流同向。图 12 为线路 L_{13} 两端差动电流,由图可看出,发生故障后差动电流迅速增大,其峰值可达到 3300 A。

4.3 电流差动保护作用时系统运行特性

采用电流差动保护时,其保护控制模块中的差

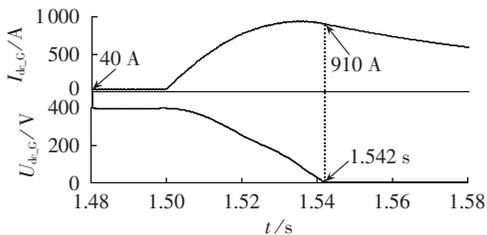


图 9 故障时 G-VSC 直流端电压和电流
Fig.9 DC voltage and current of G-VSC during fault

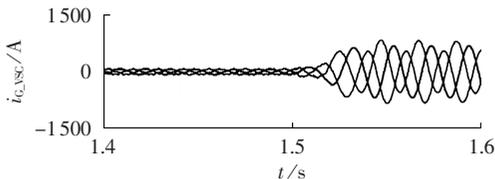


图 10 故障时 G-VSC 交流侧三相电流
Fig.10 AC three-phase currents of G-VSC during fault

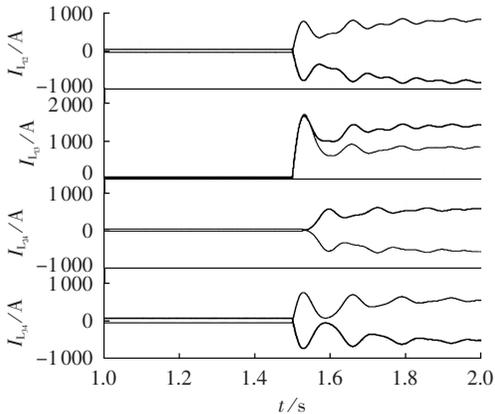


图 11 短路故障时各输电线路两端电流
Fig.11 Terminal currents of lines during short circuit fault

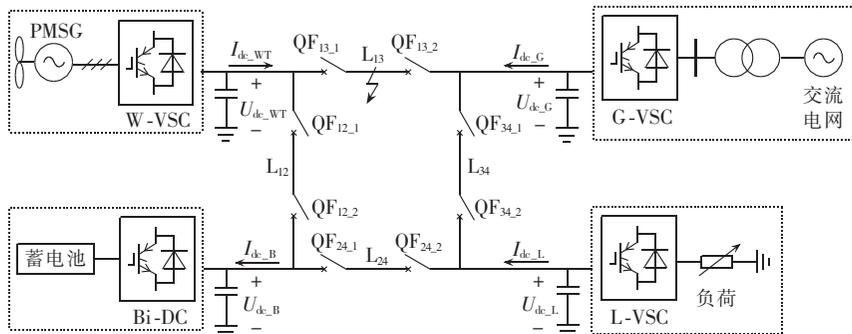


图 8 风电直流微网的仿真系统结构
Fig.8 System structure of DC microgrid with wind turbines for simulation

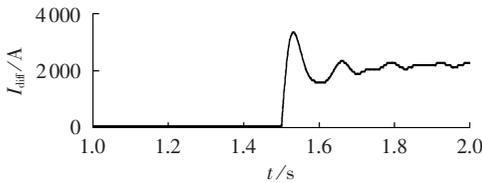
图 12 线路 L_{13} 发生短路故障时的差动电流

Fig.12 Differential current when L_{13} has short circuit fault

动电流阈值 I_{set} 设定为 3 p.u.(450 A)。故障发生后 2.6 ms,线路 L_{13} 两端差动电流到达此设定阈值。由于仿真中直流断路器由 IGBT 与电阻并联的开关模型来代替,且其动作延时设置为 1 ms,因而在短路故障发生 3.6 ms 后,故障线路两端断路器动作并隔离线路 L_{13} 。由于断路器断开时间远小于 G-VSC 直流电容电压放电至零的时间,因而微网系统线路及相应电力电子器件均得到了保护。图 13 为电流差动保护作用下联网变流器侧直流电压、电流特性。由图 13 可知,在电流差动保护作用下,故障线路直流电流最大值仅为 200 A,且随着故障线路的切除,G-VSC 也迅速恢复稳定运行,直流电压变化甚微。短路故障发生前,系统各端直流电压均位于额定值附近。随着故障后断路器的动作及故障线路 L_{13} 的隔离,直流微网转而运行于开环模式,风电功率全部经由线路 L_{12} 进行输送,无功率损失,G-VSC 仍负责维持直流系统功率平衡,微网系统在线路 L_{13} 切除后迅速恢复稳定运行。图 14 为电流差动保护作用下 G-VSC 交流侧三相电流,与图 10 对比可知,变流器的交流侧三相电流在保护作用下也变化甚微,G-VSC 根据系统内功率需求相应调整输出电流,从而保证系统稳定运行。

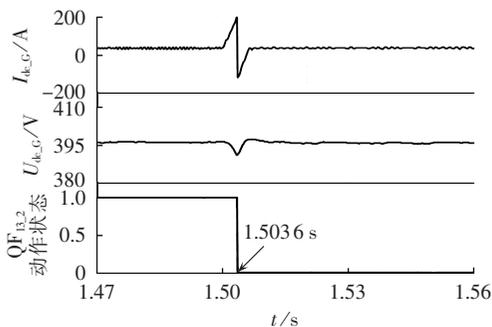


图 13 电流差动保护作用下 G-VSC 侧直流电压、电流特性

Fig.13 DC voltage and current of G-VSC with current differential protection

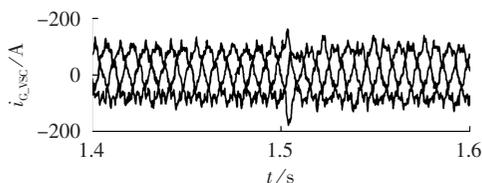


图 14 电流差动保护作用下 G-VSC 交流侧三相电流

Fig.14 AC three-phase currents of G-VSC with current differential protection

4.4 欠电压后备保护作用时系统运行特性

当微网系统直流母线发生短路故障,且由于某些原因导致电流差动保护无法正常动作时,为保护二极管不受损坏,系统启动后备欠电压保护。如图 15 所示,当各直流端电压低于设定阈值 380 V,经过 1 ms 延时仍未恢复至正常电压范围时,保护控制系统立即向断路器发出跳闸指令,断路器于 1.5038 s 迅速隔离了故障线路。欠电压保护作为第二道防线,有效防止了二极管等电力电子器件被短路电流损坏。故障线路切除后系统工作于开环状态下,不会造成风电功率损失,实现了环形风电直流微网在直流短路故障下的系统保护。

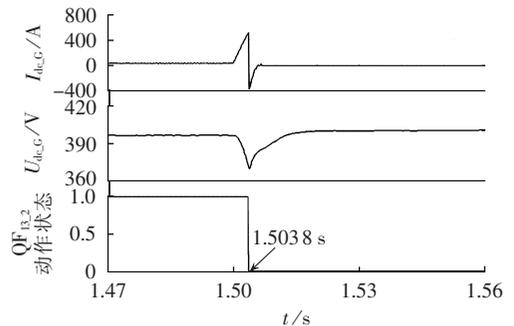


图 15 欠电压后备保护作用下 G-VSC 侧直流电压、电流特性

Fig.15 DC voltage and current of G-VSC with under-voltage backup protection

5 结论

本文研究了环形拓扑直流微网线路发生双极短路故障时系统的暂态特性,在此基础上提出了电流差动保护作为主保护、欠电压保护作为后备保护的保护控制方案,并对风电直流微网的直流短路故障及电流差动保护方案进行了仿真分析与验证。对于低压风电直流微网的短路故障,基于故障电流的方向特性,电流差动保护策略只需要检测直流母线的差动电流,能够快速、准确地对故障线路进行定位与隔离,避免线路和器件受损,提高了微网系统运行的可靠性和供电质量。

参考文献:

- [1] 杜翼,江道灼,尹瑞,等. 直流配电网拓扑结构及控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):139-145.
DU Yi,JIANG Daozhuo,YIN Rui,et al. Topological structure and control strategy of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(1):139-145.
- [2] 温家良,吴锐,彭畅,等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(13):7-12.
WEN Jialiang,WU Rui,PENG Chang,et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(13):7-12.
- [3] 宋强,赵彪,刘文华,等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(25):9-19.

- SONG Qiang,ZHAO Biao,LIU Wenhua,et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(25):9-19.
- [4] 雍静,徐欣,曾礼强,等. 低压直流供电系统研究综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(7):42-52.
- YONG Jing,XU Xin,ZENG Liqiang,et al. A review of low voltage DC power distribution system[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(7):42-52.
- [5] 王毅,张丽荣,李和明,等. 风电直流微网的电压分层协调控制[J]. 中国电机工程学报,2013,33(4):16-24.
- WANG Yi,ZHANG Lirong,LI Heming,et al. Hierarchical coordinated control of wind turbine-based DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(4):16-24.
- [6] ANAND S,FERNANDES B G,GUERRERO M. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2013,28(4):1900-1913.
- [7] TANG L X,OUI B T. Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2007,22(3):1877-1884.
- [8] PARK J D,CANDELARIA J,MA L Y,et al. DC ring-bus microgrid fault protection and identification of fault location[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2013,28(4):2574-2584.
- [9] PARK J D,CANDELARIA J. Fault detection and isolation in low-voltage DC-bus microgrid system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2013,28(2):779-787.
- [10] FLETCHER S D A,NORMAN P J,FONG K,et al. High-speed differential protection for smart DC distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2014,5(5):2610-2617.
- [11] YANG J,FLETCHER J E,O'REILLY J. Multiterminal DC wind farm collection grid internal fault analysis and protection design[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2010,25(4):2308-2318.
- [12] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京:中国电力出版社,2009:198-203.
- [13] 郭煜华,姜军,范春菊,等. 改进的配电网反时限过电流保护[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):45-50.
- GUO Yuhua,JIANG Jun,FAN Chunju,et al. Improved inverse-time over-current protection for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(10):45-50.
- [14] 张建坡,赵成勇. MMC-HVDC 直流侧故障特性仿真分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):32-37.
- ZHANG Jianpo,ZHAO Chengyong. Simulation and analysis of DC-link fault characteristics for MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(7):32-37.
- [15] 郭征,贺家李. 输电线纵联差动保护的新原理[J]. 电力系统自动化,2004,28(11):1-5.
- GUO Zheng,HE Jiali. Novel principle of pilot differential relay protection transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(11):1-5.
- [16] 丛伟,张琳琳,程学启,等. 基于故障电流幅值与相位差的电流差动保护判据[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):26-30,36.
- CONG Wei,ZHANG Linlin,CHENG Xueqi,et al. Criterion of current differential protection based on amplitude and phase difference of fault current[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(5):26-30,36.
- [17] APOSTOLOPOULOS C,KORRES G. A novel algorithm for locating faults on transposed/untransposed transmission lines without utilizing line parameters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2010,25(4):2328-2338.

作者简介:



王毅(1977—),男,河北秦皇岛人,教授,博士,主要研究方向为风力发电并网控制技术、电力电子技术在电力系统中的应用等(E-mail:yi.wang@ncepu.edu.cn)。

Short circuit fault analysis and protection scheme for looped DC microgrid

WANG Yi,YU Ming,ZHANG Lirong

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Baoding 071003,China)

Abstract: With the looped DC microgrid with wind turbines as the research object,the transient characteristics of VSC(Voltage Source Converter) during the pole-to-pole short circuit fault of DC buses are analyzed,based on which,its fault location and protection scheme with current differential protection as main protection and under-voltage protection as backup protection is proposed. The currents and differential currents of DC input and output are detected to locate and isolate the faulty lines and the under-voltage backup protection is applied to ensure the safe operation of DC microgrid with faults. MATLAB/Simulink-based simulation is carried out for the looped DC microgrid to verify the feasibility of the proposed protection strategy and results show that the designed protection system responses rapidly to the pole-to-pole short circuit fault according to the differential current to realize short circuit fault location and isolation of the DC microgrid.

Key words: DC microgrid; looped topology; pole-to-pole short circuit; failure analysis; current differential protection; electric fault location