

高压直流输电线路极间耦合影响及故障选极方案

褚旭¹,王亮²,王华伟²,宋国兵¹

(1. 西安交通大学 电气工程学院,陕西 西安 710049;
2. 中国电力科学研究院,北京 100192)

摘要:为了解决高压直流输电线路极间耦合引起的问题,提出了一种利用单极电气量的故障选极方案。耦合特性分析发现线路极间耦合程度与电气量的频率有关,且频率越高则耦合作用越显著。故障电气量频谱特性理论分析及仿真结果表明健全极电气量中低频信号含量远低于故障极。基于健全极与故障极低频信号差异,提出了仅利用单极电气量的故障极选择方法,并给出了故障选极判据。仿真结果及现场录波数据均验证了所提选极方法的可行性及有效性。

关键词:高压直流输电;线路;极间耦合;故障极选择;低频分量;单极电气量

中图分类号:TM 77

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2017.04.021

0 引言

高压直流输电(HVDC)以其输送容量大、线路造价低、控制性能好等优点,在远距离、大功率输电中占有重要地位^[1-2]。由于高压直流输电系统的输送距离远,故障后暂态谐波含量丰富,使得输电线路极间耦合作用显著,当高压直流输电线路单极非正常运行(单极重启或接地故障)时,会在健全极线路中产生感应电气量,造成健全极线路保护误动作,从而导致单极故障双极停运,危害整个电网的安全稳定运行。云广直流输电工程在 2010 及 2011 年的 2 次双极相继闭锁事故的起因均是一极线路故障引起另一极电流、电压的波动,造成健全极保护动作,并最终导致双极相继闭锁^[3]。

现有对直流输电线路耦合影响的研究多集中于交直流并架线路的偏磁影响^[4-8]和基于数字仿真的直流输电线路互感耦合影响方面^[9-12]。其中,文献[10]利用 RTDS 实时仿真软件,分析了同杆双回直流输电线路间的相互影响和同杆并架技术在直流输电中应用的可能性。文献[11]基于直流系统现场调试数据及数字仿真数据,对同塔双回直流输电线路间的相互影响程度进行了研究。文献[12]利用 EMTF 仿真软件,对特高压直流双极输电线路耦合特性及其影响因素进行了仿真分析,并提出了利用双极电压比值的保护方案。文献[13]基于四线系统解耦理论,提出了一种利用电压突变量的双回直流输电线路故障选线方法。文献[14]提出了一种利用正、负极

波形面积比值的故障选极方法。但文献[12-14]所提出的保护方案都需要另一极或回线的采样信息,保护动作逻辑复杂;对于本极轻微故障还是另一极严重故障的区分度不足,使得保护方案存在灵敏度及可靠性不足的问题。文献[15]仅基于集中参数模型分析了稳态情况下双极直流耦合特性,且未考虑单极线路故障和重启暂态过程中的极间耦合作用的影响。

为了解决高压直流输电系统存在的上述问题,本文研究了直流输电线路极间耦合特性,提出了仅利用单极采样信息的故障选极方案。所提选极方案仅利用单极低频电气量构成故障极选择判据,对硬件要求低,易于工程实现。利用直流系统故障、重启时的数字仿真数据及现场录波数据对所提故障选极方案的可行性及有效性进行验证。

1 高压直流输电线路极间耦合特性及故障特征分析

1.1 高压直流输电系统拓扑结构

图 1 以云广特高压直流输电系统为例^[2],给出了高压直流输电系统拓扑结构示意图,图中 u_p 、 u_n 和 i_p 、 i_n 分别为正极、负极电压和电流。高压直流输电系统包括整流站、逆变站及输电线路,双极直流输电线路采用同杆并架,其杆塔结构示意图如图 2 所示。图中,架空地线型号为 LBGL-180-20AC,外径为 17.5 mm,直流电阻为 0.7098 Ω /km,弧垂为 18.2 m;直流导线型号为 6×LGL-630/45,外径为 33.6 mm,直流电阻为 0.04633 Ω /km,弧垂为 16 m,分裂间距为 450 mm。

1.2 高压直流输电线路极间耦合初始特性分析

当输电线路发生单极故障时,线路故障点处会产生故障行波,并由故障点向输电线路两端传输;由于双极线路耦合作用,在健全线路上将感应产生故

收稿日期:2016-05-16;修回日期:2017-03-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477131);国家电网公司科技项目(XT71-15-049,SGSNKYOOKJJS1501564)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51477131) and Scientific and Technology Project of State Grid Corporation of China(XT71-15-049,SGSNKYOOKJJS1501564)

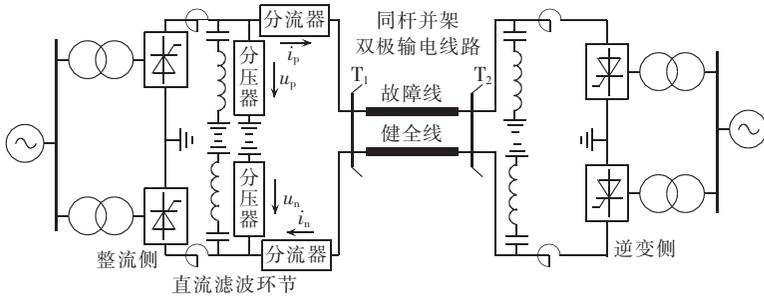


图 1 高压双极直流输电系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of bipolar HVDC transmission system

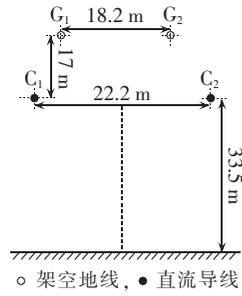
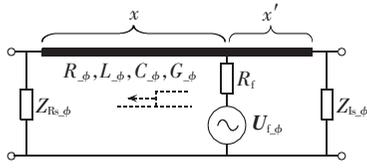


图 2 高压双极直流输电电杆塔示意图

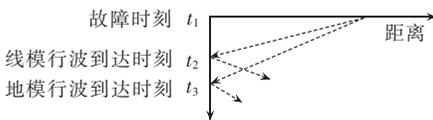
Fig.2 Schematic diagram of transmission tower of bipolar HVDC transmission system

障行波。

利用解耦矩阵^[3],可以将直流双极系统解耦为相互独立的线模、地模分量网络,其中,线模分量为 $u_1 = u_p + u_n, i_1 = i_p + i_n$,地模分量为 $u_0 = u_p - u_n, i_0 = i_p - i_n$ 。线模、地模故障网络如图 3 所示,图中, $\phi = 1$ 和 $\phi = e$ 分别表示线模和地模; $R_\phi, L_\phi, C_\phi, G_\phi$ 分别为单位长度线路的电阻、电感、电容、电导; $Z_{R_s, \phi}, Z_{L_s, \phi}$ 分别为整流侧、逆变侧的系统阻抗; $U_{f, \phi}$ 为故障支路叠加电压源; x, x' 分别为故障点与线路本端、线路对端的距离; R_f 为故障过渡电阻。根据上述地模分量的定义可知,地模分量反映了正、负极电气量的不对称,因此,地模分量出现之前,正极、负极电气量一定处于对称状态。



(a) 线模、地模故障网络

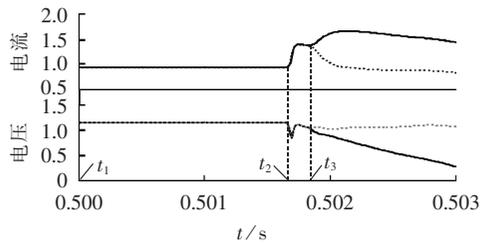


(b) 线模、地模行波时序图

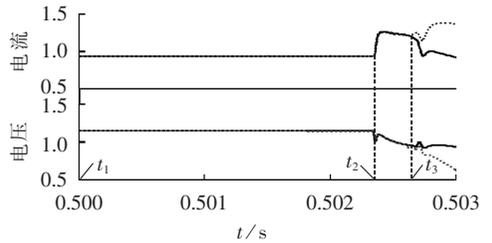
图 3 线模、地模故障网络

Fig.3 Line-/ground-mode fault network

解耦后独立的地模、线模网络参数不同,行波速度存在差异,因此地模信号相对线模信号到达时间存在延时。图 3 中,单极接地故障发生在 t_1 时刻;线模行波由故障点经 $t_2 - t_1 = x/c_1$ 的时间,在 t_2 时刻到达本端;地模行波由故障点经 $t_3 - t_1 = x/c_0$ 的时间,在 t_3 时刻到达本端。其中, c_1, c_0 分别为线模、地模行波波速。根据上述分析,地模故障分量反映线路正、负极电气量的不对称波动,在地模行波到达本端之前,线路正、负极故障电气量保持对称。建立 ± 800 kV 特高压双极直流输电系统模型,对理论分析结果进行仿真验证,如图 4 所示,其中图 4(a)、(b)分别为发生线路近端正极、远端负极故障时的电压、电流标



(a) 近端正极接地故障



(b) 远端负极接地故障

— 正极(健全极), 负极(故障极)

图 4 故障初始波形

Fig.4 Waveforms of fault in initial stage

么值。

由图 4 可知,仿真结果与理论分析一致,在 t_3 时刻前,正、负极电气量呈对称波动。因此,在地模行波到达本端即 t_3 时刻之前,无故障特征可以用于区分故障线路与健全线路;仅利用 t_3 时刻之前的电气量构造保护判据,即使能够正确判别故障线路,也会造成健全线路保护误动作;利用含有 t_3 时刻前的电气量通过积分构造保护判据,若在保证健全线路保护不误动,则保护灵敏度一定会降低。因此,本文提出了利用零模分量构造地模行波的故障选极方法,但其易受过渡电阻的影响,灵敏度低;系统重启时,需要选极元件退出或闭锁;且其不适用于双回直流系统。因此,本文基于对双极线路耦合特性的分析,提出了一种仅利用本极信息的高压直流输电线路故障选极方案。

1.3 高压直流输电线路极间耦合特性分析

图 5 为考虑双极输电线路极间耦合的无损均匀传输线路模型^[16-17]。设在 dx 左侧的正、负极电压和电流分别为 u_p, u_n 和 i_p, i_n ,在 dx 右侧的正、负极电压

和电流分别为 $u_p + \frac{\partial u_p}{\partial x} dx$ 、 $u_n + \frac{\partial u_n}{\partial x} dx$ 、 $i_p + \frac{\partial i_p}{\partial x} dx$ 、 $i_n + \frac{\partial i_n}{\partial x} dx$ ； L_0 、 C_0 分别为输电线路单位长度电感、电容； L_m 、 C_m 分别为线间单位长度耦合电感、耦合电容。

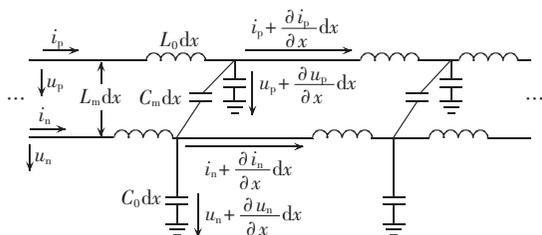


图 5 高压双极直流输电系统均匀传输线电路模型

Fig.5 Homogeneous transmission line model of bipolar HVDC transmission system

根据 KCL 及 KVL 列写结点电压及回路方程，并简化整理得：

$$\begin{cases} -\frac{\partial^2 i_p}{\partial x^2} = [-(C_0 + C_m)L_0 + C_m L_m] \frac{\partial^2 i_p}{\partial t^2} + \\ \quad [-(C_0 + C_m)L_m + C_m L_0] \frac{\partial^2 i_n}{\partial t^2} \\ -\frac{\partial^2 i_n}{\partial x^2} = [-(C_0 + C_m)L_0 + C_m L_m] \frac{\partial^2 i_n}{\partial t^2} + \\ \quad [-(C_0 + C_m)L_m + C_m L_0] \frac{\partial^2 i_p}{\partial t^2} \\ -\frac{\partial^2 u_p}{\partial x^2} = [-(C_0 + C_m)L_0 + C_m L_m] \frac{\partial^2 u_p}{\partial t^2} + \\ \quad [-(C_0 + C_m)L_m + C_m L_0] \frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2} \\ -\frac{\partial^2 u_n}{\partial x^2} = [-(C_0 + C_m)L_0 + C_m L_m] \frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2} + \\ \quad [-(C_0 + C_m)L_m + C_m L_0] \frac{\partial^2 u_p}{\partial t^2} \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可以看出，双极输电线路另一极对本极电压、电流的耦合作用体现在等式右侧的第二项，即另一极电气量对时间的二阶导数。由分析可知：

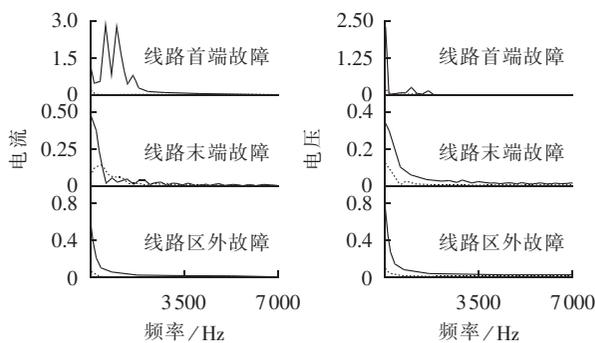
a. 正常运行时，正极、负极电气量均可近似为直流量，此时输电线路极间无耦合作用；

b. 在输电线路发生单极故障或单极重启的暂态过程中，输电线路故障极谐波含量丰富，会在健全极中耦合产生感应电气量，耦合程度由线路参数及谐波频率决定，且谐波信号频率越高，耦合作用越显著。

1.4 高压直流输电线路故障电气量频谱特征分析

为验证上述耦合特性理论分析结果，利用所建立的 ± 800 kV 特高压双极直流输电系统模型，对线路正极首端故障、末端故障以及区外故障时的正、负极故障电流和电压频谱进行对比仿真，结果如图 6 所示，图中，电压、电流均为标么值。

从图 6 中可以看出，仿真结果与理论分析一致，当发生单极故障时，由于线路极间耦合作用，健全极



(a) 线路单极故障电流频谱 (b) 线路单极故障电压频谱
— 正极, 负极

图 6 直流系统单极故障正、负极故障电压和电流频谱

Fig.6 Voltage and current spectrums of positive and negative poles of HVDC system with single-pole fault

产生感应电气量；耦合作用的强度与谐波频率有关，且高频故障谐波耦合作用强，健全极与故障极的高频信号差别不大；低频信号耦合作用弱，故障极低频信号远高于健全极。因此，可以利用单极低频电压、电流构成故障选极判据，实现故障极的判别。

2 故障选极判据及方案

2.1 高压直流输电线路故障极选择判据

由文献[18-19]可知，在非故障运行状态下，从直流侧端口看换流器为一低内阻的谐波电压源，直流输出电压存在谐波分量。对于高压直流双桥三相桥式换流器，脉波流数为 12，直流侧的特征谐波为 $600n$ Hz ($n=1, 2, 3, \dots$)。

为使故障极选择方案不受正常运行时谐波的影响，提高故障选极方案的灵敏度，本文采用 300 Hz 以下的低频信号构成如下故障极选择判据：

$$I_{\phi}(k) > I_{set} \quad (2)$$

其中， $\phi=p$ 和 $\phi=n$ 时分别表示正极和负极； k 为采样点， $k=1, 2, \dots, N$ ； $I_{\phi}(k)$ 为经过数字滤波器滤波得到的直流输电线路低频电流，本文采用的数字低通滤波器截止频率为 300 Hz； I_{set} 为故障选极门槛值， $I_{set}=0.15 I_e$ ， I_e 为直流输电系统额定电流。

需要说明的是：故障选极门槛依据本极线路发生区内最轻微故障时，故障选极元件能够正确动作进行整定；根据大量数字仿真及现场录波数据验证结果，故障选极门槛值设定为 $I_{set}=0.15 I_e$ 可以满足现有工程对故障选极元件灵敏度及可靠性的要求；由于故障极选择判据由低频电气量信号构成，因此 1.2 kHz 及以上采样频率即可满足所提出的故障极选择元件的要求。

同样可以利用单极低频电压量构成如下故障极选择判据：

$$U_{\phi}(k) > U_{set} \quad (3)$$

其中, $U_{\phi}(k)$ 为经过数字滤波器滤波得到的直流输电线路低频电压; U_{set} 为故障选极门槛值, $U_{set} = 0.25 U_e$, U_e 为直流输电系统额定电压。

2.2 高压直流输电线路故障极选择流程

利用突变电气量 $\Delta i_{\phi}(k) = i_{\phi}(k) - I_{pre_phi}$ 或 $\Delta u_{\phi}(k) = u_{\phi}(k) - U_{pre_phi}$ 构成故障选极的启动元件, 其中, I_{pre_phi} 、 U_{pre_phi} 分别为故障前的电流、电压幅值。电流、电压启动判据分别如式(4)、(5)所示。

$$\Delta i_{\phi}(k) > I_{set_s} \quad (4)$$

$$\Delta u_{\phi}(k) > U_{set_s} \quad (5)$$

其中, 启动门槛值 $I_{set_s} = 0.10 I_e$ 、 $U_{set_s} = 0.10 U_{e0}$ 。

以利用单极电流的故障极选择方案为例, 故障选极流程如图 7 所示。

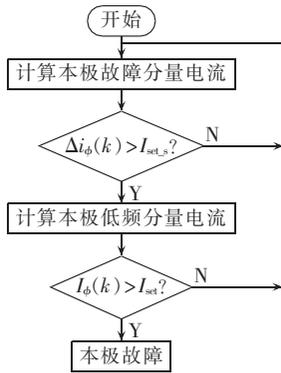


图 7 故障极选择流程
Fig.7 Flowchart of faulty pole selection

3 仿真验证

利用数字仿真数据及现场录波数据对所提故障选极方案进行验证。

3.1 仿真模型

建立 ± 800 kV 特高压直流输电系统仿真模型^[14,20], 拓扑结构如图 1 所示, 额定电流为 3.125 kA, 输电线路采用频变参数模型, 线路全长为 1500 km。

由于篇幅限制, 分别利用系统正极故障、重启仿真数据对电流量故障选极判据进行仿真验证; 利用系统负极故障、重启仿真数据及现场录波数据对电压量故障选极判据进行验证。

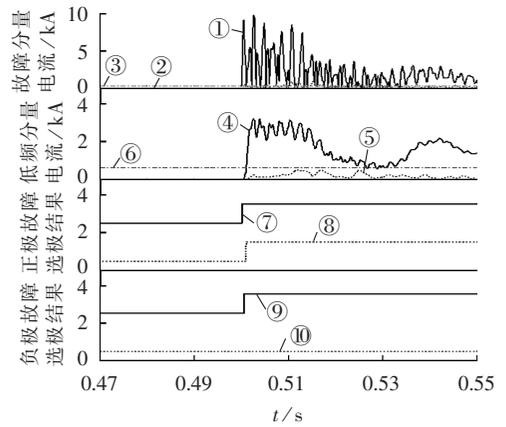
其中, 对于单极故障仿真, 单极接地故障发生在 $t = 0.5$ s 时刻, 故障持续时间为 0.5 s; 对于单极重启仿真, 在 $t = 0.5$ s 时, 单极整流侧移相 120° , $t = 0.7$ s (即 200 ms 后) 时系统单极重启, 此后触发角维持在最小值直至线路重启, 极电流建立^[16]。

3.2 电流量故障极选择元件仿真验证结果

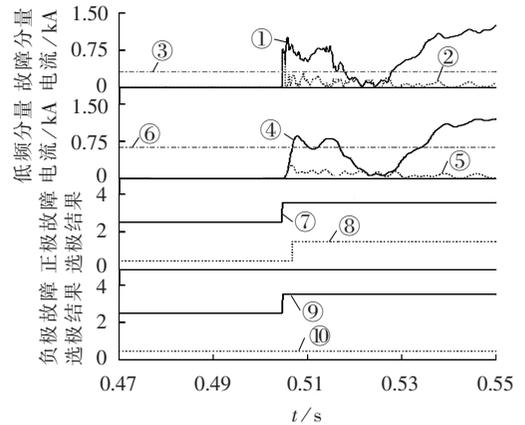
利用输电线路正极故障仿真数据, 对电流量故障极选择判据进行验证。其中, 图 8(a) 和 (b) 分别为发生首端金属性接地故障和发生末端经 100Ω 过渡电阻接地故障时的电流量故障选极元件动作结果。

从图 8 可以看出, 当发生正极故障时, 正极突变电流大于启动门槛, 正极线路的故障选极元件正确启动; 低频分量电流大于故障选极门槛, 正极线路的故障选极元件快速正确动作。由于输电线路极间耦合作用, 负极突变电流大于启动门槛, 负极线路的故障极选择元件启动, 但负极低频电流小于故障选极门槛, 负极线路故障选极元件可靠不动作。

对于单极线路区外故障及系统波动产生的影



(a) 距整流侧 1 km 处发生正极金属性接地故障



(b) 距整流侧 1499 km 处发生正极经 100Ω 过渡电阻接地故障

- ① 正极故障分量电流, ② 负极故障分量电流
- ③ 故障选极启动门槛, ④ 正极低频电流, ⑤ 负极低频电流
- ⑥ 故障极选择门槛, ⑦ 正极启动判据动作结果
- ⑧ 正极故障选极判据动作结果, ⑨ 负极启动判据动作结果
- ⑩ 负极故障选极判据动作结果

图 8 电流量故障极选择元件仿真验证结果

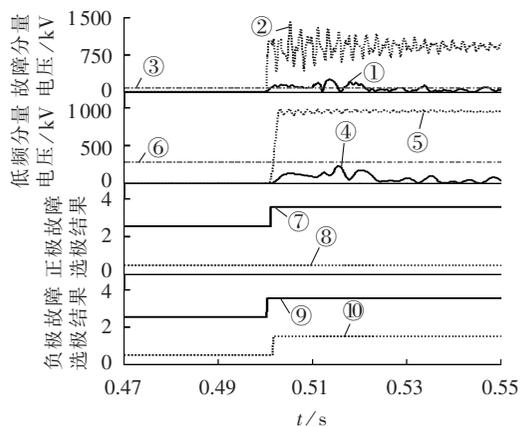
Fig.8 Simulative results of faulty pole selection based on current element

响, 由于输电线路两端均装设有平波电抗器及直流滤波器, 会对谐波信号产生阻滞作用, 使得区外故障时的线路极间耦合作用远小于区内最严重故障时的耦合作用。如图 8(a) 所示, 当发生区内最严重故障时, 健全极线路的故障选极元件仍能可靠不动作, 对于单极线路区外故障的仿真验证, 同样有该结论; 由于篇幅限制, 单极线路区外故障时的仿真验证结果不再列举。

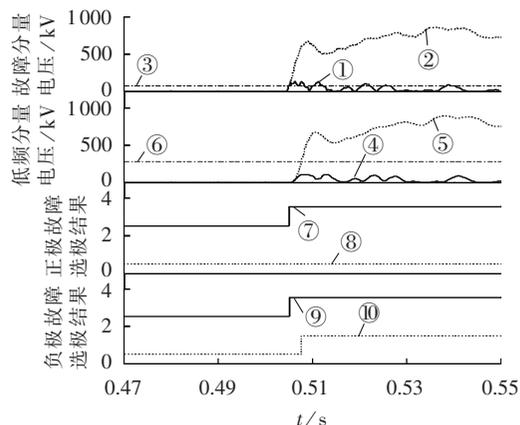
3.3 电压量故障极选择元件仿真验证结果

利用线路负极故障仿真数据, 对电压量故障极选择判据进行验证。其中, 图 9(a) 和 (b) 分别为发生首端金属性接地故障和发生末端经 100Ω 过渡电阻接地故障时的电压量故障选极元件动作结果。

从图 9 可以看出, 当发生负极故障时, 负极突变电压大于启动门槛, 正确启动负极线路的故障选极元件; 低频分量电压大于故障选极门槛, 负极线路



(a) 距整流侧 1 km 处发生负极金属性接地故障



(b) 距整流侧 1499 km 处发生负极经 100 Ω 过渡电阻接地故障

- ① 正极故障分量电压, ② 负极故障分量电压
- ③ 故障选极启动门槛, ④ 正极低频电压, ⑤ 负极低频电压
- ⑥ 故障极选择门槛, ⑦ 正极启动判据动作结果
- ⑧ 正极故障选极判据动作结果, ⑨ 负极启动判据动作结果
- ⑩ 负极故障选极判据动作结果

图 9 电压量故障极选择元件仿真结果

Fig.9 Simulative results of faulty pole selection based on voltage element

的故障选极元件正确动作。由于输电线路极间耦合作用,正极突变量电压大于启动门槛,正极线路的故障极选择元件启动,但正极低频电压小于故障选极元件门槛,正极线路故障选极元件可靠不动作。

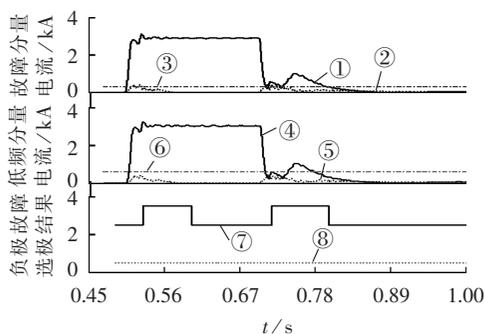
3.4 高压直流输电系统重启仿真结果

图 10(a)为系统正极重启时电流量故障选极元件动作结果,图 10(b)为系统负极重启时电压量故障选极元件动作结果。

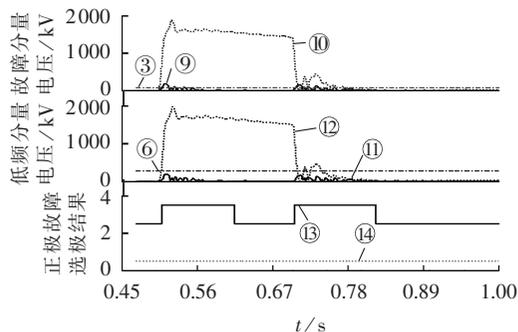
从图 10 可以看出,所提出的故障极选择方案能够在单极重启时,保证另一极故障选极元件不误动,保证健全极的正常运行。

3.5 高压双极直流系统录波数据仿真结果

利用 ±500 kV 高压直流输电系统录波数据,对所提出的故障极选择方案进行验证。高压直流输电距离整流侧 900 km 处在北京时间 2005 年 7 月 22 日 15:56 发生线路正极单极接地故障,信号采样频



(a) 系统正极重启



(b) 系统负极重启

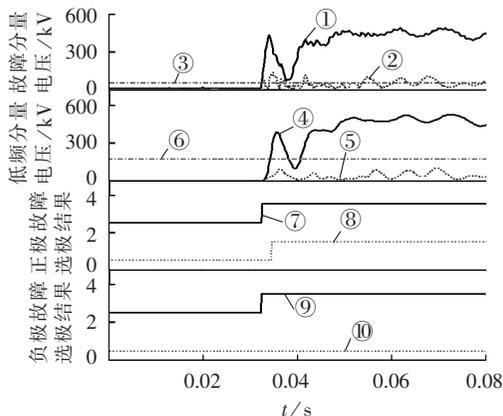
- ① 正极故障分量电流, ② 负极故障分量电流
- ③ 故障选极启动门槛, ④ 正极低频电流, ⑤ 负极低频电流
- ⑥ 故障极选择门槛, ⑦ 负极启动判据动作结果
- ⑧ 负极故障选极判据动作结果, ⑨ 正极故障分量电压
- ⑩ 负极故障分量电压, ⑪ 正极低频电压, ⑫ 负极低频电压
- ⑬ 正极启动判据动作结果, ⑭ 正极故障选极判据动作结果

图 10 高压直流输电系统重启仿真结果

Fig.10 Simulative results of HVDC transmission system restart

率为 6.4 kHz,验证结果如图 11 所示。

从图 11 可以看出,故障极线路的故障选极元件能够在 3 ms 之内快速正确动作;同时健全极线路的



- ① 正极故障分量电压, ② 负极故障分量电压
- ③ 故障选极启动门槛, ④ 正极低频电压, ⑤ 负极低频电压
- ⑥ 故障极选择门槛, ⑦ 正极启动判据动作结果
- ⑧ 正极故障选极判据动作结果, ⑨ 负极启动判据动作结果
- ⑩ 负极故障选极判据动作结果

图 11 现场录波数据

Fig.11 Field-recorded data

故障选极元件可靠不误动,从而保证了健全极的正常运行,提高了电力系统的安全稳定性。

4 结论

本文对高压直流输电线路极间耦合特性进行了分析,并根据电气量频谱分析结果,提出了故障选极方法,该方法仅利用单极电气量即可实现故障极线路选择,无需另一极线路电气量信息;且本方法利用低频信号构成选极判据,原理简单,对硬件要求低,易于工程实现。仿真及录波数据验证结果表明,当高压直流输电系统发生单极重启或单极接地故障时,故障极线路的故障选极元件能够快速正确动作,健全极线路故障选极元件可靠不误动。

参考文献:

- [1] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2004:7-10.
- [2] 中国南方电网公司. ± 800 kV 特高压输电技术研究[M]. 北京:中国电力出版社, 2006:12-15.
- [3] 杨勇. 高压直流输电技术发展与应用前景[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(9):58-60.
YANG Yong. High voltage DC transmission technique and its future application[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(9):58-60.
- [4] 隋国平. 云广特高压直流输电线路双极闭锁时安稳装置的动作分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(2):421-426.
SUI Guoping. Power safe system analysis of ± 800 kV Yun-Guang UHVDC when bipole blocking[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2):421-426.
- [5] 朱军, 吴广宁, 曹晓斌, 等. 非全线并行架设的交、直流共用输电走廊线路间电磁耦合计算分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(6):1724-1731.
ZHU Jun, WU Guangning, CAO Xiaobin, et al. Electromagnetic coupling calculation and analysis of lines non-parallelly erected entirely in one common AC/DC transmission corridor[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6):1724-1731.
- [6] 张龙伟, 朱军, 吴广宁, 等. 耦合地线对交直流同塔输电线路电气特性的影响及规律分析[J]. 电网技术, 2013, 37(5):1252-1257.
ZHANG Longwei, ZHU Jun, WU Guangning, et al. Analysis influences regularity of coupling ground wires on electrical characteristics of HVAC and HVDC transmission lines on same tower[J]. Power System Technology, 2013, 37(5):1252-1257.
- [7] 张龙伟, 吴广宁, 范建斌, 等. 交直流共走廊输电系统换流变偏磁特性研究[J]. 电网技术, 2013, 37(12):3375-3380.
ZHANG Longwei, WU Guangning, FAN Jianbin, et al. Research on DC magnetic biasing characteristic of converter transformer for AC/DC corridor-sharing power transmission system[J]. Power System Technology, 2013, 37(12):3375-3380.
- [8] 李新年, 蒋卫平, 李涛. 交直流线路同塔输电对换流变直流偏磁的影响[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(11):87-92.
LI Xinnian, JIANG Weiping, LI Tao. Influence of same-tower AC/DC hybrid transmission lines on DC bias of converter transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(11):87-92.
- [9] 朱韬析, 王超. 线路同杆并架技术在直流输电系统中应用探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1):42-46.
ZHU Taoxi, WANG Chao. Discussion on the double circuit lines used in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1):42-46.
- [10] 张民, 石岩. 同杆并架 ± 500 kV 直流系统间相互影响的实时仿真分析[J]. 电网技术, 2007, 31(1):44-49.
ZHANG Min, SHI Yan. Real-time digital simulation analysis on interaction between two ± 500 kV HVDC systems erected on the same tower[J]. Power System Technology, 2007, 31(1):44-49.
- [11] 李新年, 吕鹏飞, 杨鹏, 等. 同塔架设直流线路的相互影响研究[J]. 电网技术, 2012, 36(11):222-228.
LI Xinnian, LÜ Pengfei, YANG Peng, et al. Inter-influences between HVDC transmission lines erected on same tower[J]. Power System Technology, 2012, 36(11):222-228.
- [12] 周全, 别睿, 涂莉, 等. ± 800 kV 直流线路故障过程中电磁耦合特性与保护研究[J]. 电网技术, 2014, 38(8):2133-2140.
ZHOU Quan, BIE Rui, TU Li, et al. Research on electromagnetic coupling characteristics during fault process in ± 800 kV UHVDC transmission line and its protection strategy[J]. Power System Technology, 2014, 38(8):2133-2140.
- [13] 王海军, 周全, 梁远升, 等. 基于电压突变量的同塔双回直流输电线路故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7):23-29.
WANG Haijun, ZHOU Quan, LIANG Yuansheng, et al. Fault line selection of double-circuit HVDC transmission line based on voltage variation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7):23-29.
- [14] 束洪春, 朱盛强, 田鑫萃, 等. ± 800 kV 特高压直流线路故障选极的极波面积比值法[J]. 高电压技术, 2011, 37(4):888-895.
SHU Hongchun, ZHU Shengqiang, TIAN Xincui, et al. Polarity wave area ratio method of ± 800 kV UHVDC transmission line fault line selection[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4):888-895.
- [15] 王钢, 李志铿, 李海锋. ± 800 kV 特高压直流线路暂态保护[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21):40-48.
WANG Gang, LI Zhikeng, LI Haifeng. Transient based protection for ± 800 kV UHVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21):40-48.
- [16] 吴维韩, 张芳榴. 电力系统过电压数值计算[M]. 北京:科学出版社, 1989:27-65.
- [17] SONG Guobing, SUONAN Jiale, XU Qingqiang, et al. Parallel transmission lines fault location algorithm based on differential component net[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(4):2396-2406.
- [18] 刘水平, 饶娜. ± 500 kV 超高压直流输电直流滤波电容器及装置的开发[J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 30(1):1-3.
LIU Shuiping, RAO Di. Development of DC filtering capacitors and installations for ± 500 kV extra HVDC transmission[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 30(1):1-3.
- [19] 宋蕾, 文俊, 闫金春, 等. 高压直流输电系统直流滤波器设计[J]. 高电压技术, 2008, 34(4):647-651, 677.
SONG Lei, WEN Jun, YAN Jinchun, et al. Design of DC filters

in HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2008,34(4):647-651,677.

[20] 陈仕龙, 束洪春, 叶波, 等. 云广±800 kV 特高压直流输电系统精确建模及仿真[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2012, 37(2):43-48.

CHEN Shilong, SHU Hongchun, YE Bo, et al. Accurate modeling and simulation of Yunnan-Guangdong ±800 kV UHVDC transmission system[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 37(2):43-48.

作者简介:

褚旭(1988—), 女, 山东济宁人, 博士研究生, 主要研



褚旭

究方向为电力系统继电保护(E-mail:chuxu@hotmail.com);

王亮(1973—), 男, 河北保定人, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为高压直流输电控制保护技术(E-mail:wliang@epri.sgcc.com.cn);

王华伟(1971—), 男, 山东诸城人, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为高压直流输电控制保护技术(E-mail:whw3000@epri.sgcc.com.cn);

宋国兵(1972—), 男, 河南信阳人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail:song.gb@mail.xjtu.edu.cn)。

Analysis of inter-pole coupling effect and faulty pole selection for HVDC transmission line

CHU Xu¹, WANG Liang², WANG Huawei², SONG Guobing¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Aiming at the inter-pole coupling effect of HVDC transmission line, a faulty pole selection scheme based on the electrical variables of single pole is proposed. The characteristic analysis of inter-pole coupling shows that, the coupling effect is related to the frequency of electrical variables; the higher the frequency is, the more obvious the coupling effect is. Theoretical spectrum analysis and simulative results show that, the content of low-frequency signals in the electrical variables of healthy pole is much lower than that of faulty pole, based on which, a faulty pole selection scheme based on the electrical variable of single pole is proposed and its criterion is given. The feasibility and validity of the proposed scheme are verified by the simulative results and field-recorded data.

Key words: HVDC power transmission; electric lines; inter-pole coupling; fault pole selection; low-frequency component; electrical variable of single pole

(上接第139页 continued from page 139)

萧璐(1992—), 女, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要研究方向为大型工业企业智能电网、大功率电力电子技术在电力系统中的应用(E-mail:xiaojun9283@163.com);

毛承雄(1964—), 男, 湖北武穴人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为大型同步发电机励磁控制、大功率电力电子技术在电力系统中的应用(E-mail:cxmao@hust.edu.cn)。

High-quality power-supply for data center

LIU Shu¹, ZHANG Gaoyan², SHI Shan¹, TU Liming¹, WANG Yuanchao², XIAO Jun², MAO Chengxiong²

(1. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The existing power-supply scheme for data center normally needs both AC/DC and DC/AC conversions while the uninterrupted power-supply normally needs the inverter to supply power for loads. A high-quality power-supply scheme is proposed to improve its reliability and quality. The topological structure of the proposed scheme is given, based on which, its working principle and mathematical model are analyzed. A coordinated control strategy based on voltage compensation control, power balance between two power sources and emergency power-supply is presented and verified based on MATLAB/Simulink. The research results show that, the proposed scheme compensates the voltage swell, voltage sag and harmonics of power grid very well, realizes the power balance between two power sources, and maintains the uninterrupted power-supply during the outage of both power sources.

Key words: data center; high-quality power-supply; coordinated control strategy; voltage compensation; coordinated power allocation; uninterrupted power-supply