

DOI: 10.7652/xjtuxb201402010

分频输电系统交交变频器桥臂短路故障研究

滕予非¹, 宁联辉², 王锡凡²

(1. 国家电网四川省电力公司电力科学研究院, 610072, 成都; 2. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 根据晶闸管开关特性,对分频输电系统中交交变频器发生桥臂短路后电气量的故障特性进行分析。分析中考虑了整流状态、逆变状态及正反桥切换阶段等 3 种工况,给出了低频侧电压波形和低频、工频侧电流的计算方法,得到了分频输电系统变频器桥臂短路故障时,系统电气量的特征规律。分析结果表明,分频输电系统在变频器桥臂短路故障时存在着桥臂换相失败、低频侧电压有效值明显降低以及工频侧出现较大的故障电流等特征。与拖动用的交交变频器比较,分频输电系统中变频器主要运行在逆变状态,工频侧的短路电流幅值得到了明显抑制,工频侧的短路电流峰值可能较整流状态减少 40% 以上。计算结果验证了以上分析的正确性。

关键词: 交交变频器;桥臂短路;分频输电;故障分析

中图分类号: TM72 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)02-0056-06

Short Fault of Bridge Arm in Cycloconverter for Fractional Frequency Transmission System

TENG Yufei¹, NING Lianhui², WANG Xifan²

(1. State Grid Sichuan Research Institute, Chengdu 610072, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In a fractional frequency transmission system (FFTS), the fault characteristics are analyzed by switching property of thyristor when short-circuit fault occurs in one of the cycloconverter bridge arms. The different operation modes of the cycloconverter, i. e., the rectifier mode, the inverter mode and bridge-switching stage, are taken into consideration. The calculating method for voltage on the lower frequency side and currents on both lower frequency side and industrial frequency side are proposed, and the fault characteristics of the cycloconverter are thus quantitatively described. Analysis shows that in case of short-circuit fault, the bridge arms fail for commutating, the voltage on the low frequency side drops obviously, and the fault current on industrial frequency side gets very large. However the cycloconverter in FFTS usually works in the rectifier mode, the peak value of fault current on its industrial frequency side can be reduced by over 40%. Simulations verify the above analysis.

Keywords: cycloconverter; short fault of the bridge arm; fractional frequency transmission system; fault analysis

分频输电系统作为一种新型的高压输电方式,首次将交交变频器引入输电领域,因此整个输电系统在远距离输电和风力发电领域倍受关注^[1-2]。由于系统的可靠性、故障情况下的运行状态及其保护都是

收稿日期: 2013-06-01。 作者简介: 滕予非(1984—),男,博士,工程师;宁联辉(通信作者),男,讲师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51307136);国家“863 计划”资助项目(2012AA050201)。

网络出版时间: 2013-10-18 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20131018.0744.004.html>

值得研究的^[3-4]。文献[5]对分频输电系统主要的设备交交变频器发生桥臂断路时的运行状态进行分析,而本文则要对变频器桥臂发生短路故障时的运行状态进行研究。

桥臂短路是由于桥臂内部、外部绝缘损坏,或晶闸管元件被短接而造成的故障。在晶闸管元件组成的桥臂中,一旦出现晶闸管经历反向电压幅值大幅度的跃变或者晶闸管冷却系统故障时往往会造成绝缘损坏,从而使晶闸管短路。该故障发生时,桥臂将失去对正向及负向电压的阻断能力,从而周期性的引起换相失败,并导致故障阀电流急剧增大,是变频器最为严重的故障之一。

桥臂短路同样是直流输电系统最严重的一种故障^[6-7],文献[8]对直流输电桥臂短路情况进行了详细的分析,结果表明,直流输电系统整流桥发生桥臂短路时,系统电气量的特征有:

- (1)交流侧交替发生两相短路和三相短路;
- (2)通过故障阀的电流反向,并剧烈增大;
- (3)交流侧电流激增,使交流阀和换流变压器承受比正常时大得多的电流;
- (4)直流侧母线电压下降,直流侧电流下降。

当直流输电逆变器出现短路故障时,将会周期性地出现换相失败,同时出现逆变器交流侧两相短路。以上分析对分频输电变频器桥臂短路的研究有较大的启发作用。但是,交交变频器的控制方式与直流输电换流器有较大区别,例如分频输电系统低频侧电流基波以正弦规律变化,不像直流输电为直流电流,而且交交变频器还存在着换桥问题。因此,分频输电系统变频器桥臂短路故障的状态与直流输电同样故障的工作状态有较大差异,需要重新进行研究。

国外有学者对拖动用变频器整流状态下出现桥臂短路进行分析,并给出了低频侧电压波形^[9-10]。但是,分频输电用变频器与拖动用的变频器工作条件有较大差别。首先,分频输电低频侧接有发电机及输电线路,这与拖动用变频器低频侧直接接阻感负载有所区别。其次,变频器的工作状态有整流和逆变两种,且分频输电系统变频器主要工作在逆变状态,因此仅对整流状态下短路时逆变器的工作状态进行研究,不能解决分频输电系统实际问题。再次,拖动用变频器中性点不接地,因此单相的故障往往会对其余两相产生影响,而根据文献[5]的分析,考虑绝缘因素,分频输电用交交变频器中性点必须直接接地,这也造成了相同故障时两者工作状态会有所差异。最后,以上文献对故障情况进行分析时,

并没有考虑短路对换桥的影响。因此,分频输电系统变频器短路故障时工作状态与以上文献中所述有较大的差异。

本文分析了分频输电系统变频器发生的桥臂短路故障对工作在整流、逆变、换桥3种状态时低频侧和工频侧产生的影响,并给出了低频侧电压波形和低频、工频侧电流的计算方法。最后,得出了分频输电系统变频器桥臂故障的一般规律,并通过算例仿真加以验证。

1 变频器桥臂短路故障电压电流分析

分频输电系统变频器单相六脉波结构如图1所示。由于分频输电系统变频器可能工作于整流、逆变两种状态,同时运行过程还存在正、反桥间的切换,为此,以下将根据晶闸管的导通特性,对变频器分别工作于整流状态、逆变状态以及正、反桥切换阶段时,正桥发生桥臂短路故障后,变频器低频侧输出电压情况进行分别讨论。

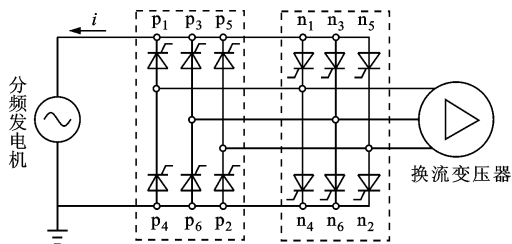


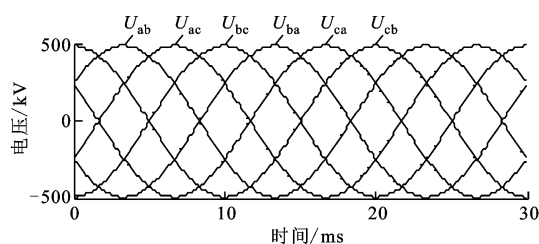
图1 分频输电变频器单相结构图

1.1 整流状态下的故障分析

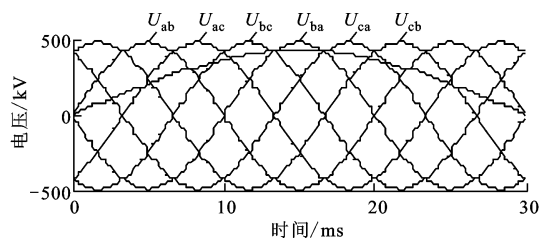
根据文献[4],设定分频输电系统低频侧频率为50/3 Hz,变频器生成低频正弦超前工频侧 U_{ab} 相角为 10° 。假设a相正桥 p_2 晶闸管发生短路故障,正桥工作时低频侧输出波形及故障发展情况见图2。故障的具体发展情况可详细叙述如下,阶段号与图2c中的号码对应。

(1)时段变频器正桥 p_3 、 p_4 两管触发,正常时应该输出电压 U_{ba} 。由于 p_2 管短路,这样就会在 p_2 、 p_4 两管之间形成环流,由图2a可知,这一时段内 $U_{ac} < 0$,所以 p_4 两端的电压为正向电压, p_4 管持续导通。此时低频侧实际输出电压为 $0.5(U_{ba} + U_{bc})$,而变频器工频侧则处于a、c两相短路接地状态。

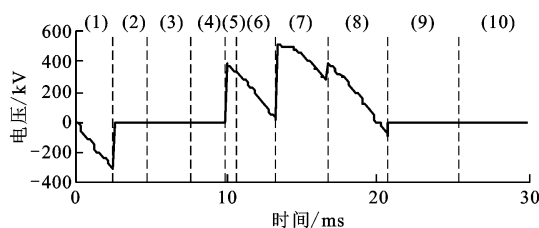
(2)时段变频器正桥 p_5 、 p_4 两管触发, $U_{ac} < 0$,基于同上的理由, p_4 管持续导通。此时实际导通的管子有 p_2 、 p_4 、 p_5 三个,低频侧通过 p_2 、 p_5 两管单相接地短路,低频侧输出电压为0,而变频器工频侧则依然处于a、c两相短路接地状态。



(a) 工频侧输入电压



(b) 余弦交点法示意图



(c) 低频侧电压波形

图2 整流状态短路故障时的波形

(3)时段变频器的 p_5 、 p_6 管被触发,虽然这一时段 $U_{ac} > 0$,但是流经 p_2 、 p_4 两管之间的环流由于换流变压器的作用将滞后电压将近 90° ,因此这段时间内 I_{ac} 没有反向, p_4 依然没有关断。此时, p_6 两端承受的电压为 $0.5(U_{ab} + U_{cb})$,并且由图 2a 可知, p_6 承受正向电压。所以,这时段内正桥有 p_5 、 p_2 、 p_4 、 p_6 四个晶闸管导通,低频侧输出电压为 0,而工频侧则出现三相短路故障。

(4)时段触发的晶闸管为 p_1 、 p_6 ,与时段(3)原因相同,低频侧单相短路输出电压为 0,而工频侧则继续处于三相短路状态。

(5)时段触发的晶闸管与时段(4)相同,然而由于 I_{ac} 反向,因此 p_4 被关断。此时,低频侧输出电压为 $0.5(U_{ab} + U_{ac})$,工频侧则由三相短路转为两相短路接地状态。

(6)时段晶闸管 p_1 、 p_2 被触发,由于环流依然存在,所以 p 晶闸管 6 无法关断。低频侧输出电压保持为 $0.5(U_{ab} + U_{ac})$,工频侧依然为两相短路接地状态。

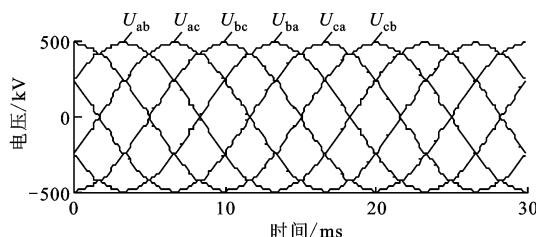
(7)时段 I_{bc} 反向, p_6 关断,同时晶闸管 p_3 、 p_2 触发,低频侧输出电压与所希望的相同,即为 U_{bc} ,而工频侧则为正常状态。

(8)~(10)时段的分析与(1)~(3)时段相同。

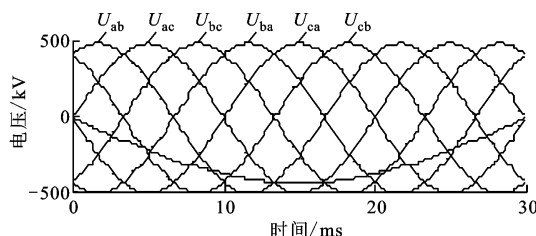
当反桥工作在整流状态时,桥臂短路故障产生的影响与上文相同,只是判断管子被触发是否导通的判据与上面所述有所区别。当变频器 p_1 、 p_3 和 p_5 号管发生短路时,其低频侧输出电压与上面所述类似,只是工频侧不会出现两相短路接地故障,而是两相短路故障。

1.2 逆变状态下的故障分析

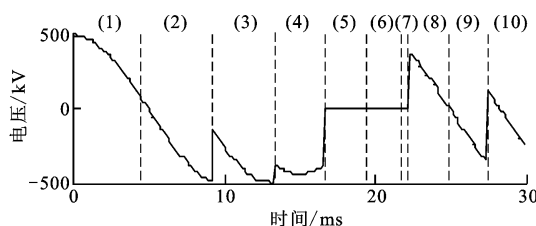
采用 1.1 节所设定的工况,这时正桥处于逆变状态,低频侧输出电压为负,如图 3 所示。



(a) 工频侧输入电压



(b) 余弦交点法示意图



(c) 低频侧输出电压

图3 逆变状态短路故障的波形

为方便分析,假定分析的 0 时刻正桥没有管子导通,则变频器具体发展情况可详细叙述如下,其中阶段号与图 3c 中的号码对应。

(1)时段触发的晶闸管为 p_1 、 p_6 ,且 $U_{bc} > 0$,因此 p_6 承受反压,无法导通,变频器换相失败,此时 p_4 管也由于环流 I_{ac} 反向而关断,因此正桥导通的管子有 p_1 和 p_2 ,输出电压为 U_{ac} ,工频侧处于正常状态。

(2)时段触发的晶闸管为 p_1 、 p_2 ,因此低频侧输出电压为 U_{ac} ,工频侧处于正常状态。

(3)时段 p_3 、 p_2 晶闸管被触发,低频侧输出电压为 U_{bc} ,工频侧处于正常状态。

(4)时段 p_3 、 p_4 晶闸管被触发,而 $U_{ac} > 0$,因此 p_4 得以导通,低频侧输出电压为 $0.5(U_{ba} + U_{bc})$,工频侧两相短路接地。

(5)时段 p_5 、 p_4 晶闸管被触发,且 $U_{ac} > 0$, p_4 继续导通,由于 p_5 、 p_2 管导通,因此低频侧输出电压为 0,工频侧两相短路接地。

(6)时段 p_5 、 p_6 晶闸管被触发,由于 $U_{bc} > 0$,因此 p_6 承受反压,无法导通。但是,这一时段 I_{ac} 并未反向,因此 p_4 并未关断,低频侧输出为 0,而工频侧继续两相短路接地故障。

(7)时段依然是 p_5 、 p_6 晶闸管被触发,但是由于 I_{ac} 反向,因此 p_4 关断,正桥导通的晶闸管只有 p_5 和 p_2 ,低频侧输出电压为 0,而工频侧没有故障发生。

(8)~(10)时段的分析与(1)~(3)时段相同。

与整流时类似,在考虑反桥工作及 p_1 、 p_3 、 p_5 号晶闸管发生短路时的分析与上述类似,只是需要在判断晶闸管导通与否的判据及工频侧故障情况上略加修整。

1.3 正反桥换桥时的故障分析

换桥时短路故障的分析比较复杂,与换桥前工作的晶闸管、换桥后工作的管子都有关系,因此只能对换桥时出现的可能性进行分析。

首先,若换桥前导通的晶闸管大于 2 个,即出现了除了短路的外还有 2 个晶闸管正常工作的情况,那么在换桥时,与短路管子出现环流的管子将会继续工作,直至环流减为 0。因此,随着换桥后触发的管子不同,若被触发的管子都能导通,工频侧可能出现两相短路(接地)、三相短路等情况。

其次,由于换桥前导通的晶闸管可能无法关断,因此换桥时低频侧输出电压基波将与希望生成的波形有一些差异,而可能出现被触发的晶闸管正承受反压,因而发生不能导通的情况。此时会出现换桥失败,整个系统将处于断路状态,低频系统电流为 0,直至电流换相,换桥成功。

1.4 故障电流计算

本文在分析分频输电低频电流计算时,为突出特点,做以下假设:①不计低频输电线路对地电容;②不计晶闸管并联电阻的影响;③不计换桥时同时闭锁两桥对电流的影响。分频输电系统交交变频器可视为一个电压源,其等效电路如图 4 所示。

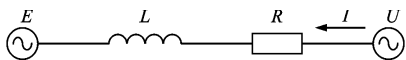


图4 分频输电系统等效电路

分频输电系统低频侧电流的表达式为

$$E \sin(\omega_o t + \varphi_E) + iR + L di/dt = U \quad (1)$$

式中: E 是低频发电机电势幅值; ω_o 是系统低频侧频率; φ_E 是低频发电机初相位; L 为低频系统等值电感; R 为低频系统等值电阻; U 为交交变频器的等值电压。

交交变频器的等值电压在正常工作时可由余弦交点法得到,故障时可由以上故障时变频器输出电压分析得到。根据以上的分析, U 在每一段时间内都可以用 0 或者工频与低频正弦的线性组合表示,因此 U 可以表示为

$$U = \alpha \sin(\omega_i t + \varphi_1) + \beta \sin(\omega_i t + \varphi_2) + \gamma \sin(\omega_o t + \varphi_o), \quad \alpha, \beta, \gamma \geq 0 \quad (2)$$

式中: ω_i 为系统工频侧频率。因此,可以通过式(1)、式(2)利用数值算法或直接求解解出低频侧电流。

由于工频侧故障时故障电流远远大于正常时负载电流,因此计算工频侧故障电流时可忽略负载电流的影响。因此,当工频侧两相短路(接地)时,故障电流为

$$2L_T di/dt = 2^{1/2} U_1 \sin(\omega_i t + \varphi) \quad (3)$$

式中: L_T 为换流变压器单相电感; U_1 为工频侧线电压有效值。当工频侧三相短路时,故障电流为

$$L_T di/dt = (2/3)^{1/2} U_1 \sin(\omega_i t + \varphi) \quad (4)$$

工频侧正常工作时的电流,可见文献[5]。

2 分频输电系统桥臂短路故障特征

经过以上分析,可以得到分频输电系统变频器桥臂短路故障的一般规律如下。

(1)当变频器工作在整流状态时,工频侧交替发生两相(接地)短路和三相短路,而工作在逆变环节时工频侧将出现两相(接地)短路故障,变频器换相失败。由于分频输电系统大部分工作在逆变状态,因此随着功角的加大,工频侧出现三相短路的概率将降低。因此,在相同故障情况下,分频输电系统中交交变频器的故障电流较其在拖动场合下拖动的故障电流要小。

(2)变频器在晶闸管之间出现故障环流,环流幅值由工频侧电压和换流变压器的电感决定,但远远大于正常负载电流;

(3)变频器换桥时情况比较复杂,有可能出现工频侧两相短路(接地)、三相短路或低频侧断路等故障。

(4)变频器交流侧电流激增,使交流阀和换流变

压器承受比正常时大得多的电流。

(5)变频器低频侧母线基波电压下降。

与直流输电和拖动用交交变频器相比,分频输电用变频器在换桥时故障状态比较复杂,且由于主要工作在逆变状态,工频侧出现三相短路概率减小,因此工频侧产生的故障电流可能较前两种情况会有所减小,但依然远远大于负载电流。由于变频器工作在逆变状态会发生换相失败,因此利用低频侧母线基波电压下降、工频侧电流过大及变频器晶闸管导通状态与正常时不一致等判据,都能检测出故障。

3 算例仿真

利用一个典型的分频输电系统,对变频器桥臂短路故障进行仿真验证,系统示意图如图 5 所示。

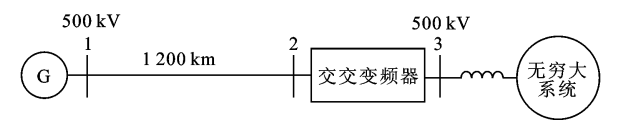


图 5 算例分析示意图

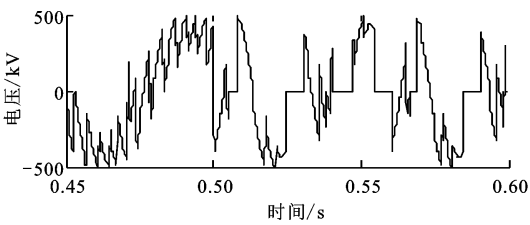
根据文献[3],图 5 中设定分频输电系统低频侧线电压为 500 kV,输电线路长度为 1 200 km,低频侧频率为 50/3 Hz,变频器生成低频 a 相基波相电压超前工频侧 U_{ab} 的相角为 10° ,低频侧角为 70° 。

设定 0.5 s 时 a 相正桥 p_2 管绝缘击穿,发生短路故障。利用 Matlab/Simulink 仿真计算出的变频器 a 相 0.45~0.6 s 低频侧输出电压、电流及工频侧 a 相电流波形如图 6 所示。

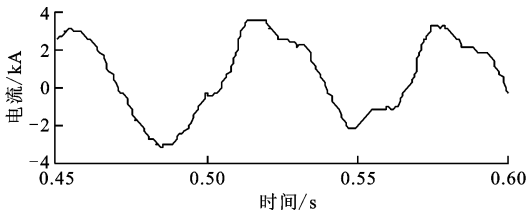
由图 6 可知,当交交变频器发生桥臂短路故障时,低频侧的电压发生了明显的畸变,工频侧电压有明显提高。对仿真结果进行分析,可以得到 0.53~0.547 2 s 这段时间变频器工作状态、晶闸管的导通情况及低频侧与工频侧的故障情况由如表 1 所示。

通过图 6 以及表 1 所示的结果,可以获得以下

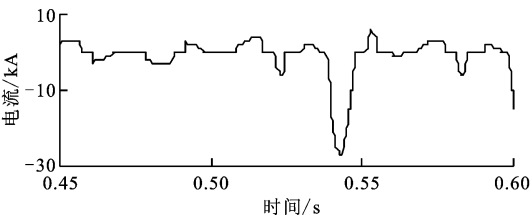
几点判断。



(a)变频器 a 相低频侧电压波形



(b)变频器 a 相低频侧电流波形



(c)变频器 a 相工频侧电流

图 6 a 相正桥 p_2 管短路故障变频器波形
(故障时间为 0.5 s)

(1)由于交交变频器桥臂出现了短路故障,导致变频器无法正常换相,变频器在故障下换相次序与前文理论分析相同。

(2)由于系统功角较大,因此变频器大多处于逆变状态。因此由表 1 可知,整个过程中主要出现工频侧两相接地故障以及换流器换相失败故障,未出现工频侧三相短路故障。

(3)系统在从正桥至反桥的换桥过程中,由于 p_2 、 p_4 管之间存在环流,因此出现反桥 n_1 管已经触

表 1 故障时变频器工作状态

时段/s	工作状态	触发晶闸管	导通晶闸管	低频侧故障	工频侧故障
0.530 0~0.530 3	逆变	p_5 、 p_6	p_5 、 p_2	换相失败、单相短路	无
0.530 3~0.533 1	逆变	p_1 、 p_6	p_1 、 p_2	换相失败	无
0.533 1~0.535 7	逆变	p_1 、 p_2	p_1 、 p_2	无	无
0.535 7~0.538 3	逆变	p_3 、 p_2	p_3 、 p_2	无	无
0.538 3~0.539 4	整流	p_3 、 p_4	p_3 、 p_4 、 p_2	无	两相短路接地
0.539 4~0.541 0	换桥	n_1 、 n_6	n_1 、 p_4 、 p_2	换相失败	两相短路接地
0.541 0~0.542 7	换桥	n_1 、 n_2	n_1 、 p_4 、 p_2	换相失败	两相短路接地
0.542 7~0.547 2	逆变	n_3 、 n_2	n_3 、 p_2	无	无
0.547 2~0.550 0	逆变	n_3 、 n_4	n_3 、 n_4 、 p_2	无	两相短路接地

发而正桥 p_2 、 p_4 管却没有关闭的情况。在该情况下,反桥 n_6 管无法导通,而工频侧处于两相短路接地状态。如果 n_6 管在 p_2 、 p_4 关闭前导通,工频侧将变为三相短路状态。

(4)由于变频器周期性的换相失败,其低频侧电压无法保持正弦变化,经常性的维持在0,并持续数毫秒,因此其电压有效值会明显降低。通过对图6a的计算可以得出,低频侧电压基波相电压的有限值为133.8 kV,远小于正常时基波相电压有效值的288.67 kV。

(5)故障时系统工频侧电流出现明显提高,最大故障电流接近30 kA,显著高于负荷电流。对比图6c与表1可以发现,当电流明显增大时,主要是变频器工频侧处于两相短路接地的时刻。同时,对比图6b与图6c可以发现,由于低频侧没有出现短路故障,低频侧电流没有明显提升,由此可见短路电流主要是通过不同桥臂形成环流,没有流入低频侧。

综上所述,通过对典型系统进行仿真,得出的有关故障后电气量的结果与前文理论分析得出的结论是一致的,从而验证了理论分析的正确性。

将变频器低频侧的发电机改为阻感负载,在工频侧系统参数以及换流变压器参数不变的情况下,当变频器发生相同故障时,工频侧短路电流峰值接近50 kA,较逆变状态下的30 kA有了明显增加。这是由于当变频器处于整流状态时,工频侧交替发生两相短路(接地)和三相短路,其故障形式比变频器逆变运行时更为严重,这也与之前的理论分析结果相符。

4 结 论

本文对分频输电交交变频器在整流、逆变、换桥3种工况下,发生桥臂短路故障时低频侧、工频侧电气量特性进行了分析,给出了低频侧电压波形和低频、工频侧电流的计算方法,得到了分频输电系统变频器桥臂短路故障时系统电气量的特征规律。分析结果表明,分频输电系统在桥臂短路时存在着桥臂无法正常换相、低频侧电压有效值明显降低以及工频侧出现较大的故障电流等特征。将其与拖动用的交交变频器相比较,由于分频输电系统中变频器主要运行在逆变状态,工频侧主要的故障类型为两相短路(接地),发生三相短路的可能性较小,因此工频侧的短路电流幅值得到了明显的抑制。算例仿真结果验证了以上分析的正确性,在本算例中由于变频器主要运行在逆变状态,其故障下产生的短路电流比工作在整流状态下的变频器减小了40%。

参考文献:

- [1] 王锡凡,王秀丽,滕予非. 分频输电系统及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 1-6.
WANG Xifan, WANG Xiuli, TENG Yufei. Fractional frequency transmission system and its applications [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 1-6.
- [2] 宁联辉,王锡凡,滕予非,等. 风力发电经分频输电接入系统的实验[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 9-16.
NING Lianhui, WANG Xifan, TENG Yufei, et al. Experiment on wind power grid integration via fractional frequency transmission system [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(21): 9-16.
- [3] WANG Xifan, CAO Chengjun, ZHOU Zhichao. Experiment on fractional frequency transmission system [J]. IEEE Trans on Power System, 2006, 21(1): 372-377.
- [4] 曹成军. 分频输电系统的动模创建及实验研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2006.
- [5] 滕予非,王锡凡,邓敏. 分频输电系统变频器桥臂不导通故障及相关问题[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 69-72.
TENG Yufei, WANG Xifan, DENG Min. Cycloconverter non-conduction fault and related problems in fractional frequency transmission system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 69-72.
- [6] 方太勋,朱振飞,田杰,等. 直流输电系统的动态模拟[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(10): 80-83.
FANG Taixun, ZHU Zhenfei, TIAN Jie, et al. Dynamic simulation of the HVDC system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(10): 80-83.
- [7] 颜秉勇,田作华,施颂椒,等. 高压直流输电系统故障诊断新方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(16): 57-61.
YAN Bingyong, TIAN Zuohua, SHI Songjiao, et al. A new method for fault diagnosis in HVDC systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(16): 57-61.
- [8] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 123-127.
- [9] PONTT J, RODRIGUEZ J, REBOLLEDO J, et al. Operation of high power cycloconverter-fed gear less drive under abnormal conditions [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2007, 43(3): 814-820.
- [10] ILLANES I, PONTT J, RODRIGUEZ J. Model-based fault diagnosis applied to 6-pulse cycloconverter [C]// IEEE Power Electronics Specialists Conference 2007. Piscataway, USA: IEEE, 2007: 684-689.

(编辑 杜秀杰)