

# 风力发电对双电源快速切换的影响

卜繁多, 梁志珊, 夏鹏程

(中国石油大学(北京), 北京 102249)

**摘要:** 风力发电的大量接入使配电网成为有源网络, 影响了快速切换装置的正确动作。以含有风力发电(永磁同步发电机组和双馈异步发电机组)的某石化厂6 kV终端变电站为例, 利用电力系统分析软件包EDSA建立仿真模型, 分析风力发电对快速切换装置的影响。仿真结果表明: 含有永磁同步发电机组的变电站在发出的无功功率小于负载所需的无功功率时, 有利于进行快速切换, 而在发出的无功功率大于负载所需的无功功率时, 会出现电压升高的情况, 很有可能超过设备的保护定值, 需要修改现有的切换判据; 含有双馈异步发电机组的变电站无论发电机组发出的有功功率大于或小于负载所需的有功功率, 均不利于进行快速切换。针对含有风力发电的变电站提出了改进的快速切换判据: 对于含有永磁同步发电机组的变电站增加了现有判据中对母线电压上限的约束, 对于含有双馈异步风力发电机组的变电站扩大了现有判据中对母线电压下限的约束。  
**关键词:** 风力发电; 永磁同步发电机组; 双馈异步发电机组; 快速切换; 切换判据

## Influence of wind power generation on fast transfer of double power supply

BU Fan-duo, LIANG Zhi-shan, XIA Peng-cheng

(China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

**Abstract:** The large-scale access of wind power generation to the distribution network makes it become the active network and affects the correct action of the fast transfer devices. This paper takes a 6 kV terminal substation of a petrochemical plant with the wind power generation connected for example, builds a simulation model by the EDSA software and analyzes the influence on fast transfer caused by the wind power generation (permanent magnet synchronous generators and double fed induction generator). The simulation results show that it's helpful for fast transfer while the reactive power of permanent magnet synchronous generators is smaller than that of the loads. However, it needs to modify the available transfer criterion because the bus voltage will grow up or may exceed the protection setting value of the device when the reactive power of permanent magnet synchronous generators is larger than that of the loads. The situation that the active power of double fed induction generators is larger or smaller than that of the loads is not helpful for fast transfer. Meanwhile, this paper presents an improved fast transfer criterion for the power system with the wind power generation: adding the upper limit's constraint of bus voltage in the available transfer criterion for the power system with the permanent magnet synchronous generators; and enlarging the lower limit's constraint of bus voltage in the available transfer criterion for the power system with the double fed induction generator.

**Key words:** wind power generation; permanent magnet synchronous generators; double fed induction generator; fast transfer; transfer criterion

中图分类号: TM762.1 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)03-0001-08

## 0 引言

双电源切换装置的正确性、快速性、安全性和可靠性, 是防止工作电源故障跳闸造成负荷断电停机事故的重要保障<sup>[1-2]</sup>。它已广泛应用于石油、钢铁、

化工、冶金、煤炭等企业变电站中<sup>[3-5]</sup>。

风能是可以循环利用的绿色清洁能源, 由于其具有清洁、无污染、可再生、促进经济发展等特点, 越来越受到各国的青睐。风能与其他新能源相比利用率大, 是理想的可再生能源<sup>[6-7]</sup>。目前风电市场中, 永磁同步发电机组<sup>[8]</sup>和双馈异步风力发电机组<sup>[9]</sup>应用最为广泛。

对于风能对备自投的影响方面, 已有一些研究

**基金项目:** 中国石油大学(北京)前瞻导向基金项目(批准号: 2010QZ03)资助; 中国石油天然气股份有限公司基金项目(KY-11-104)

工作。文献[10]分析了备自投含风能时和常规能源不同，提出了区域备自投的构想。文献[11]研究了分布式电源对备自投的影响，提出在备自投投入前切除分布式电源。由于工业企业负荷容量的不断增加和对供电连续性和可靠性要求的不断提高，工业企业变电站广泛使用快速切换装置代替备自投来实现工作电源与备用电源之间的切换<sup>[12]</sup>。然而，对于含有风力发电的变电站对快速切换的影响尚未见到研究报道。

因此，本文以风力发电中的永磁同步发电机组和双馈异步发电机组接入某石化厂 6 kV 终端变电站为例，用 EDSA 软件建立仿真模型，分析了含有永磁同步发电机组和双馈异步发电机组的变电站对快速切换的影响，并且分析了母线电压特性及其是否满足现有判据要求，最后提出了一种改进电压限制的快速切换判据。

### 1 变电站系统简介

图 1 为某石化厂 6 kV 终端变电站等效接线图，风力发电 DG 通过 6 kV 母线 I 段接入变电站，系统的运行方式为：QF2 在分位，QF1、QF3 在合位。设置系统在  $t=0.5$  s 时 QF1 发生三相断线误跳故障，在  $t=0.57$  s 时 QF2 合闸，仿真时间为 3 s。

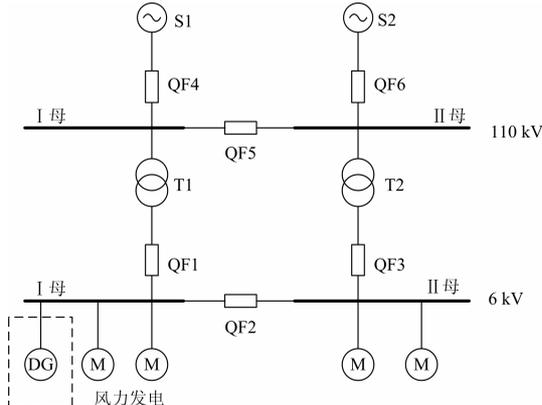


图 1 6 kV 终端变电站等效接线图

Fig. 1 Connection diagram of 6 kV terminal substation

该变电站的快速切换装置的判据整定参数为：母线电压不低于正常电压的 70%；备用电源电压不低于正常电压的 80%；频率差为  $\pm 1$  Hz；相角差为  $\pm 20^\circ$ 。现分别对于永磁同步发电机组和双馈异步发电机组两种情况讨论系统发生三相断线误跳故障对快速切换的影响。

### 2 永磁同步发电机组对快速切换的影响

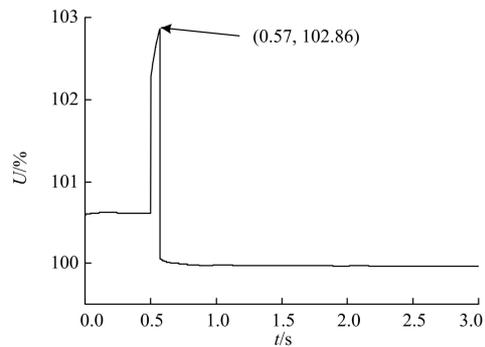
图 1 中的风力发电为永磁同步发电机组时，根据母线的 4 种运行方式讨论系统发生误跳故障时永磁同步发电机组对快速切换的影响。

#### 2.1 发电有功 ( $P_G$ ) 大于负荷有功 ( $P_L$ )，无功 ( $Q_G$ ) 大于负荷无功 ( $Q_L$ )

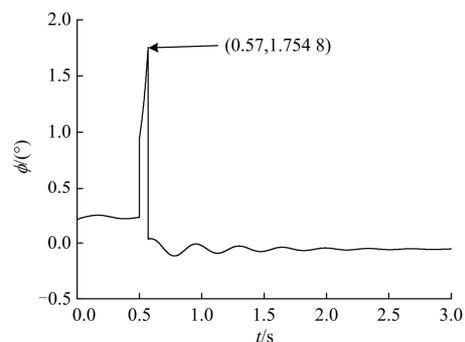
图 2 为  $P_G$  大于  $P_L$ ， $Q_G$  大于  $Q_L$  时 QF1 所在线路发生误跳故障后母线残压、相角差、频率和母联冲击电流的切换过程曲线。

由图 2(a)~图 2(c)可知，当  $P_G$  大于  $P_L$ ， $Q_G$  大于  $Q_L$ ，合闸时刻  $t=0.57$  s 时，母线残压  $U=102.86\%$ ，大于正常电压的 70%；相角差为  $\Delta\phi=1.7548^\circ$ ，小于整定值  $\pm 20^\circ$ ；频率差为  $\Delta f=0.047$  Hz，小于整定值  $\pm 1$  Hz。综上所述，根据该变电站的快速切换判据，满足快速切换条件，可进行快速切换。图 2(d)为投入快速切换装置后母联的冲击电流，由图可知冲击电流为稳定运行电流的 1.9 倍，未超过设备保护定值，这是由于在切换时电压差、相角差和频率差都很小，因此冲击电流小。所以切换过程中不会使电气设备和电网受到很大冲击。

但是由于  $Q_G$  大于  $Q_L$ ，在未与电网断开时，发电机组发出的多余的  $Q_G$  送回电网，当与电网断开后，发电机组发出的  $Q_G$  无处可送，导致母线电压升高并且高于额定电压，同时由于  $P_G$  大于  $P_L$ ，在未与电网断开时，发电机组发出的多余的  $P_G$  送回电网，而在脱离电网后，多余的  $P_G$  无处可送，导致母线频率升高。而系统中的电气设备均有保护定值。若母线电压超过保护定值，则设备会跳闸。现有快切装置的判据并没有设定母线电压的上限，因此，对快速切换装置的影响不确定。



(a) 残压曲线(U)



(b) 相角差曲线( $\Delta\phi$ )

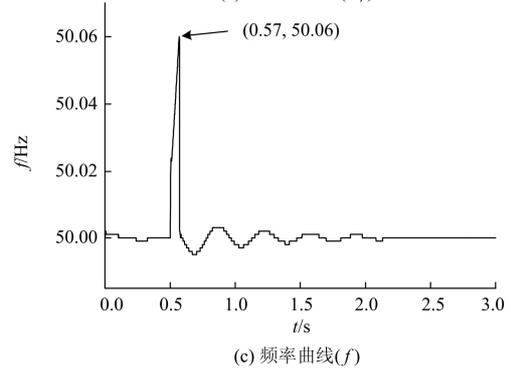
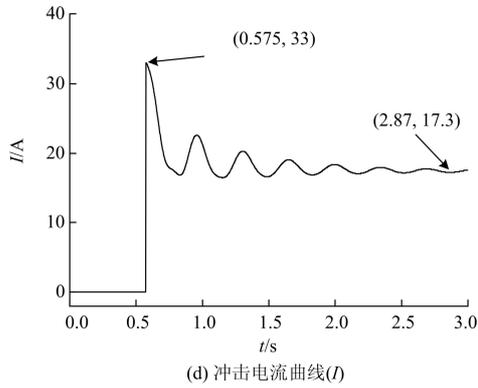
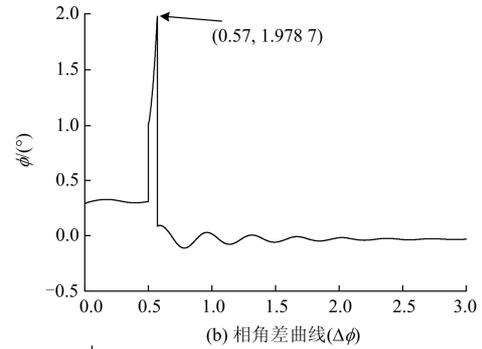
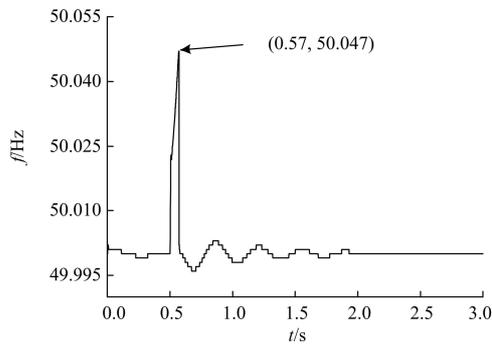


图 2  $P_G$  大于  $P_L$ ,  $Q_G$  大于  $Q_L$  时残压( $U$ )、相角差( $\Delta\phi$ )、频率( $f$ )和冲击电流( $I$ )曲线

Fig. 2 Curve of residual voltage, angle, frequency and rush current while  $P_G$  is bigger than  $P_L$  and  $Q_G$  is bigger than  $Q_L$

## 2.2 发电有功大于负荷有功, 无功小于负荷无功

图 3 为  $P_G$  大于  $P_L$ ,  $Q_G$  小于  $Q_L$  时 QF1 所在线路发生误跳故障后母线残压、相角差、频率和母联冲击电流的切换过程曲线。

由图 3(a)~图 3(c)可知, 当  $P_G$  大于  $P_L$ ,  $Q_G$  小于  $Q_L$ , 合闸时刻  $t = 0.57$  s, 母线残压  $U = 98.715\%$ , 大于正常电压的 70%; 相角差为  $\Delta\phi = 1.9787^\circ$ , 小于整定值  $\pm 20^\circ$ ; 频率差为  $\Delta f = 0.06$  Hz, 小于整定值  $\pm 1$  Hz。综上可知, 满足快速切换判据, 可进

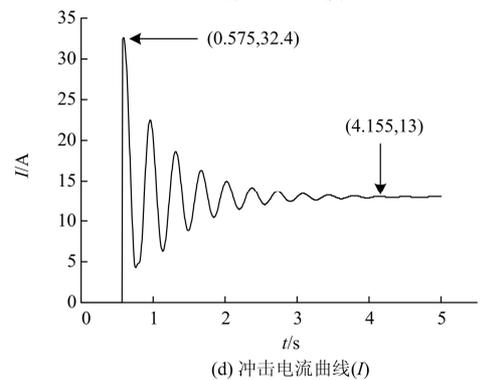
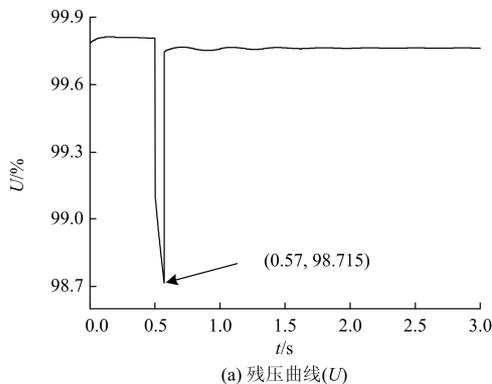


图 3  $P_G$  大于  $P_L$ ,  $Q_G$  小于  $Q_L$  时残压( $U$ )、相角差( $\Delta\phi$ )、频率( $f$ )和冲击电流( $I$ )曲线

Fig. 3 Curve of residual voltage, angle, frequency and rush current while  $P_G$  is bigger than  $P_L$  and  $Q_G$  is smaller than  $Q_L$

行快速切换。图 3(d)为投入快速切换装置后的母联冲击电流, 由图可知冲击电流为稳定运行电流的 2.5 倍, 未超过设备保护定值。所以在切换过程中不会使电气设备和电网受到很大冲击, 有利于进行快速切换。

## 2.3 发电有功小于负荷有功, 无功小于负荷无功

图 4 为  $P_G$  和  $Q_G$  均小于  $P_L$  和  $Q_L$  时, QF1 所在线路发生误跳故障后母线残压、相角差、频率和母联冲击电流的切换过程曲线。

由图 4(a)~图 4(c)可知, 当  $P_G$  和  $Q_G$  均小于  $P_L$  和  $Q_L$ , 合闸时刻  $t = 0.57$  s 时, 母线残压  $U = 98.357\%$ , 大于正常电压的 70%; 相角差为  $\Delta\phi = -1.2578^\circ$ , 小于整定值  $\pm 20^\circ$ ; 频率差为  $\Delta f = 0.035$  Hz, 小于

整定值 $\pm 1$  Hz。综上可知,满足快速切换判据,可进行快速切换。图 4(d)为投入快速切换装置后的母联冲击电流,由图可知冲击电流为稳定运行电流的 1.78 倍,未超过设备保护定值。所以在切换过程中不会使电气设备和电网受到很大冲击,有利于进行快速切换。

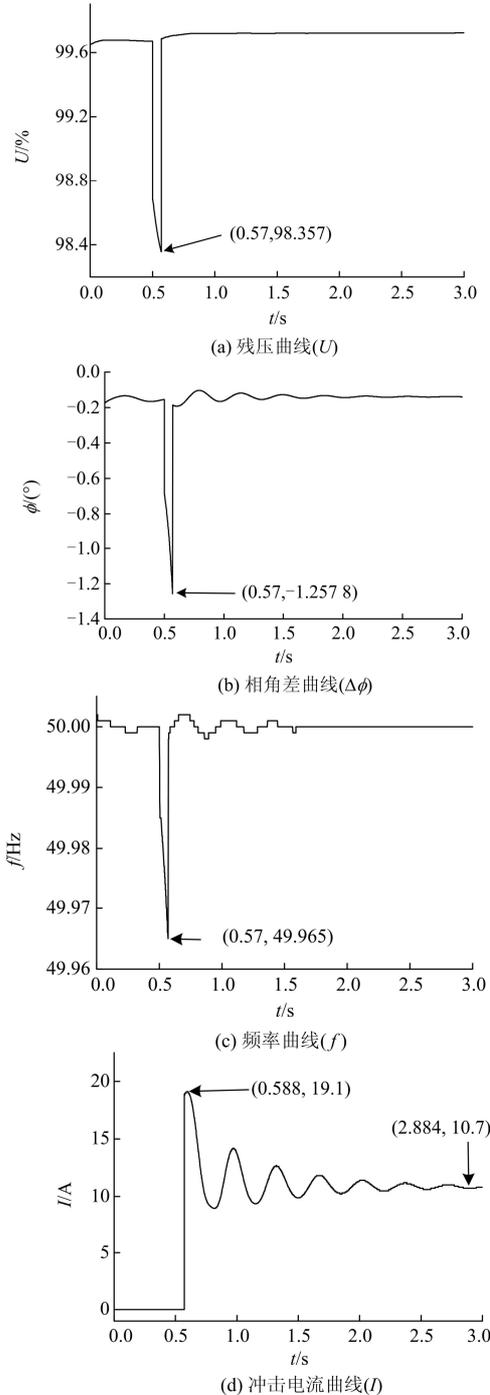


图 4  $P_G$  小于  $P_L$ ,  $Q_G$  小于  $Q_L$  时残压( $U$ )、相角差( $\Delta\phi$ )、频率( $f$ )和冲击电流( $I$ )曲线

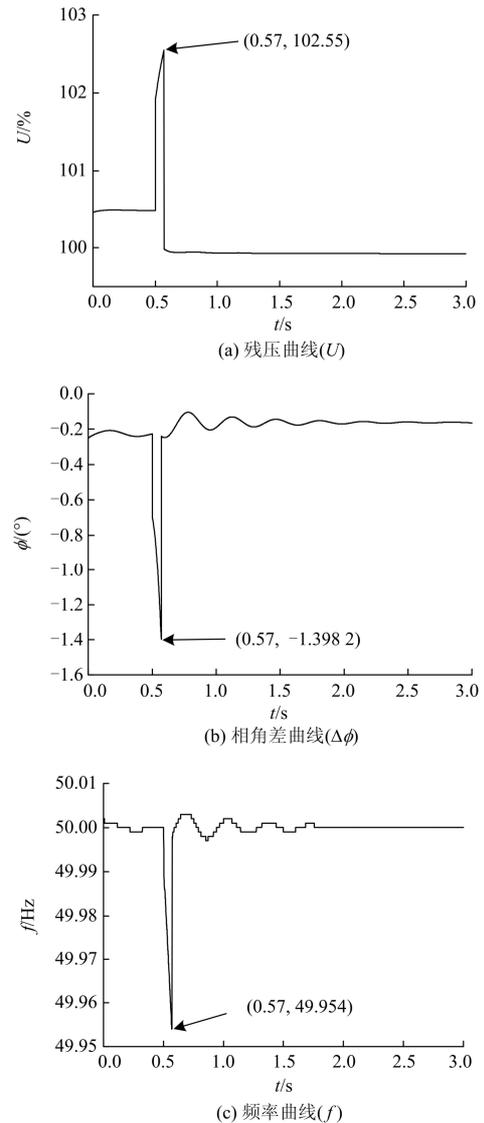
Fig. 4 Curve of residual voltage, angle, frequency and rush current while  $P_G$  is smaller than  $P_L$  and  $Q_G$  is smaller than  $Q_L$

## 2.4 发电有功小于负荷有功,无功大于负荷无功

图 5 为  $P_G$  小于  $P_L$ ,  $Q_G$  大于  $Q_L$  时, QF1 所在线路发生误跳时母线残压、相角差、频率和冲击电流特性曲线。

由图 5(a)~图 5(c)可知,当  $P_G$  小于  $P_L$ ,  $Q_G$  大于  $Q_L$ , 合闸时刻  $t=0.57$  s 时,母线残压  $U=102.55\%$ , 大于设定电压 70%; 相角差为  $\Delta\phi = -1.3982^\circ$ , 小于整定值  $\pm 20^\circ$ ; 频率差为  $\Delta f = 0.046$  Hz, 小于整定值  $\pm 1$  Hz。综上可知,满足快速切换判据,可进行快速切换。图 5(d)为投入快速切换装置后的母联冲击电流,由图可知冲击电流为稳定运行电流的 1.89 倍,未超过设备保护定值。

但是母线电压高于正常电压值,而系统中的电气设备均有保护定值,若母线电压超过保护定值,则设备会跳闸。现有快切装置的判据并没有设定母线电压的上限,因此对快速切换装置的影响不明确。



(c) 频率曲线( $f$ )

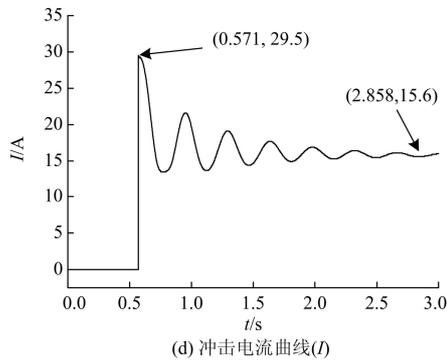


图5  $P_G$  小于  $P_L$ ,  $Q_G$  大于  $Q_L$  时残压( $U$ )、相角差( $\Delta\phi$ )、频率( $f$ )和冲击电流( $I$ )曲线

Fig. 5 Curve of residual voltage, angle, frequency and rush current while  $P_G$  is smaller than  $P_L$  and  $Q_G$  is bigger than  $Q_L$

根据对以上四种运行方式的仿真分析可知, 含有永磁同步发电机组的变电站, 系统发生故障后, 会出现母线电压升高的情况, 而高出多少是根据发电机组容量和负荷的比例来决定, 因此很有可能高于其他设备的保护定值。若母线电压超过设备保护定值, 则设备自我保护跳闸, 将会导致切换失败。而现有快速切换判据中只设定母线电压整定值的下限, 对上限并没有要求。因不会出现电压升高的情况, 现有判据对不含有同步发电机组的系统仍适用。但对于含有永磁同步发电机组的系统, 现有的判据不适用此种情况。因此, 有必要对原有判据进行修改, 需要增加对母线电压上限的约束, 建议设定母线电压上限值为 1.1 倍正常电压以提高快速切换成功率。

同时, 当永磁同步发电机组发出的无功功率小于负荷所需时, 由于故障段母线的电压仍维持在较高值, 与备用母线电压差很小, 相角差和频率差也很小, 这种情况有利于快速切换的进行。

### 3 双馈异步风力发电机组对双电源快速切换的影响

图 1 中的风力发电为双馈异步发电机组时, 讨论系统发生误跳故障时双馈异步风力发电机对快速切换的影响。双馈异步发电机组需要从电网中吸收无功功率以建立磁场, 进一步向电网输出有功功率。如果没有无功来源, 即没有电网, 双馈异步发电机组是没有能力发电的<sup>[13]</sup>。

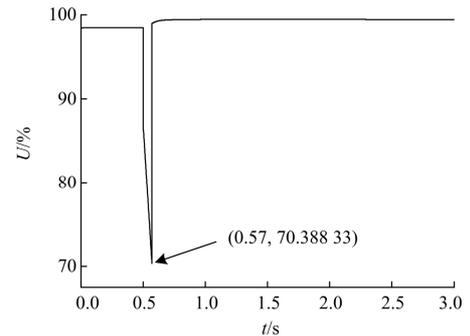
#### 3.1 发出的有功功率小于负载所需

图 6 为  $P_G$  小于  $P_L$  时 QF1 所在线路发生误跳故障后母线残压、相角差、频率和母联冲击电流的切

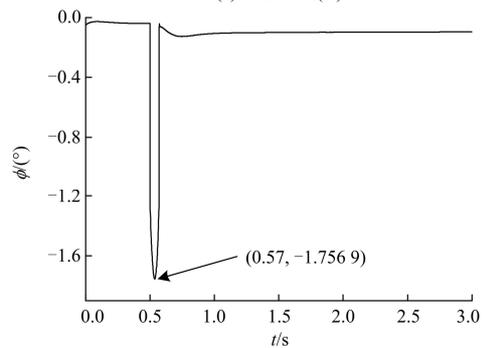
换过程曲线。

由图 6(a)~图 6(c)可知,  $P_G$  小于  $P_L$ , 合闸时刻  $t = 0.57$  s, 母线残压  $U = 70.388\%$ , 大于正常电压的 70%; 相角差为  $\Delta\phi = -1.7569^\circ$ , 小于整定值  $\pm 20^\circ$ ; 频率差为  $\Delta f = 0.525$  Hz, 小于整定值  $\pm 1$  Hz。综上所述可知, 根据该变电所的快速切换判据, 满足快速切换条件, 图 6(d)为投入快速切换装置后的母联冲击电流, 由图可知冲击电流为稳定运行电流的 2.2 倍, 未超过设备保护定值, 切换过程中不会使电气设备和电网受到很大冲击。

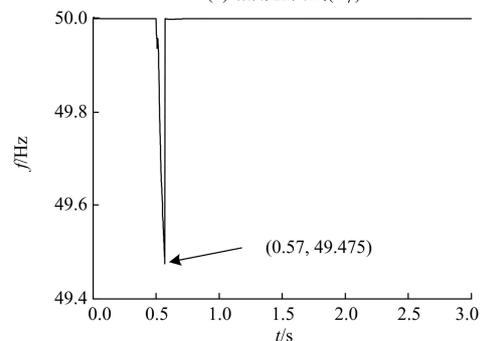
但是工作母线在发生故障后电压下降很快, 这是由于双馈异步发电机在脱离电网后本身不能发出无功, 没有能力发电。与负荷共同作用导致母线电压下降很快, 虽然满足切换判据, 但是正好在设定值的边界, 若切换时间延长则将会导致切换失败。因此, 这种情况不利于进行快速切换。



(a) 残压曲线( $U$ )



(b) 相角差曲线( $\Delta\phi$ )



(c) 频率曲线( $f$ )

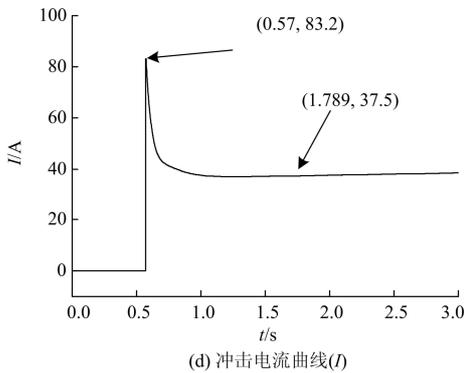


图 6  $P_G$  小于  $P_L$  时残压( $U$ )、相角差( $\Delta\phi$ )、频率( $f$ )和冲击电流( $I$ )曲线

Fig. 6 Curve of residual voltage, angle, frequency and rush current while  $P_G$  is smaller than  $P_L$

### 3.2 发出的有功功率大于负载所需

图 7 为  $P_G$  大于  $P_L$  时 QF1 所在线路发生误跳时母线残压、相角差、频率和母联冲击电流特性曲线。

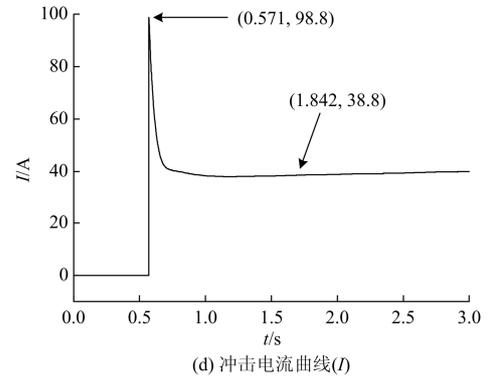
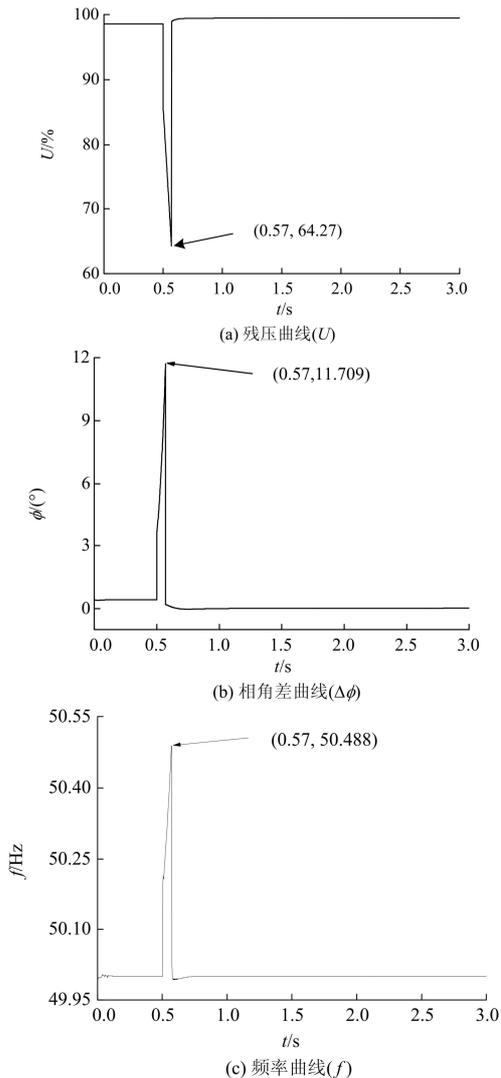


图 7  $P_G$  大于  $P_L$  时残压( $U$ )、相角差( $\Delta\phi$ )、频率( $f$ )和冲击电流( $I$ )曲线

Fig. 7 Curve of residual voltage, angle, frequency and rush current while  $P_G$  is bigger than  $P_L$

由图 7(a)~图 7(c)可知,  $P_G$  大于  $P_L$ , 合闸时刻  $t = 0.57$  s, 母线残压  $U = 64.27\%$ , 小于正常电压的 70%; 相角差为  $\Delta\phi = 11.709^\circ$ , 小于整定值  $\pm 20^\circ$ ; 频率差为  $\Delta f = 0.488$  Hz, 小于整定值  $\pm 1$  Hz。综上可知, 根据该变电所的快速切换判据, 不满足快速切换条件, 无法进行快速切换。图 7(d)为投入快速切换后母联冲击电流, 由图可知冲击电流为稳定运行电流的 2.54 倍, 未超过设备保护定值, 切换过程中不会使电气设备和电网受到很大冲击。

虽然切换过程的冲击电流很小, 但是工作母线在发生故障后电压下降很快, 不满足切换判据, 不能进行快速切换。

根据以上两种情况的分析, 含有双馈异步风力发电机组的变电站, 在脱离电网后, 无论发出有功大于或小于负荷有功, 均会导致母线电压下降过快, 若切换时间较长则将导致切换失败, 因此不利于进行快速切换。但是, 根据冲击电流曲线可知, 这两种情况在切换过程中的冲击电流都很小, 在切换过程中对设备不会造成很大的冲击, 可以进行快速切换。然而, 以上两种情况却不满足现有快速切换判据, 根据现有快速切换判据不能实现快速切换。因此, 若想要成功的进行切换, 则需要修改切换判据, 扩大切换判据中的电压下限的范围, 建议母线电压下限设为正常电压的 60%来实现快速切换, 提高切换的成功率。

## 4 快速切换判据的改进

现有快速切换判据是以母线电压下限、备用电源电压下限、频差范围和相角差范围为判据标准。但是, 对于含有永磁同步发电机组的变电站中, 这一快速切换判据并不适用。根据前一部分的仿真分

析发现, 由于含有永磁同步发电机, 在失去外部电源后, 母线电压会出现上升并且高于正常电压的情况, 而在快速切换判据中对于母线电压的上限值并没有设定, 这就将导致无论母线电压上升多高, 快速切换均会动作且认为是正确的动作。但是, 考虑到系统中电动机等设备均有电压保护定值, 一般不超过正常电压的 1.1 倍<sup>[14]</sup>。若超过了电压保护定值则设备自我保护跳闸, 最终导致快速切换失败, 更为严重的将会损坏其他电力设备。

而对于含有双馈异步发电机组的变电站, 在失去外部电源后, 会导致母线电压下降过快, 若切换时间较长则将导致切换失败。但是, 此时的冲击电流却很小。

基于以上几点的分析, 为了保证快速切换装置正确动作, 对于含有永磁同步发电机的变电站, 十分有必要对现有快速切换装置的判据进行修改。必须要增加对判据电压上限的设定, 不大于正常电压的 1.1 倍。对于含有双馈异步风力发电机组的变电站, 需要扩大电压下限范围, 不低于正常电压的 60% 以提高快速切换成功率。

## 5 结论

本文以风力发电机组接入某石化厂 6 kV 终端变电站为例, 利用 EDSA 软件建立仿真模型, 分析永磁同步发电机组和双馈异步发电机组对快速切换装置的影响。从分析结果可以得出以下结论:

(1) 含有永磁同步风力发电机组的变电站对快速切换的影响根据发电机组发出功率与负荷所需功率的比例不同而不同, 当发出的无功功率小于负载所需时, 有利于进行快速切换; 当发出的无功功率大于负载所需时, 需要补充现有判据中母线电压的上限设定值。

(2) 含双馈异步风力发电机组的变电站无论发电机组发出的有功大于或小于负荷所需, 在脱离电网后, 会导致母线电压下降过快, 若切换时间较长则将导致切换失败, 不利于进行快速切换。同时, 由于切换时冲击电流小, 不会对设备造成较大的冲击, 可以进行快速切换, 因此, 若要成功地进行快速切换, 需要扩大现有判据中母线电压的下限。

可见, 对于含有风力发电的变电站, 增加了判据中的母线电压上限的设定, 扩大母线电压下限的设定, 可以有效地提高快速切换的成功率。

## 参考文献

[1] 周雪松, 崔立强, 马幼捷, 等. 高压电源快切对企业电网继电保护影响的研究[J]. 电工电能新技术, 2012,

31(3): 45-48.

ZHOU Xue-song, CUI Li-qiang, MA You-jie, et al. Analysis of influence on protective relaying of enterprise's power system at power switching[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2012, 31(3): 45-48.

[2] 兀鹏越, 何信林, 王团结, 等. 厂用电大角切换问题探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 59-62.

WU Peng-yue, HE Xin-lin, WANG Tuan-jie, et al. Discussion of power supply transfer in big power angle[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 59-62.

[3] 李经升, 王舜, 韩学义. 厂用电快速切换装置的应用研究[J]. 继电器, 2002, 30(7): 37-39.

LI Jing-sheng, WANG Shun, HAN Xue-yi. Application research on the auxiliary power high-speed transfer device[J]. Relay, 2002, 30(7): 37-39.

[4] 孙建鹏, 韩文花, 张永健, 等. 对一起母线保护动作造成的发电机停机事故的分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(2): 145-148.

SUN Jian-peng, HAN Wen-hua, ZHANG Yong-jian, et al. Analysis of an accident of generator tripping caused by bus protection action[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(2): 145-148.

[5] 付英杰, 梁志珊. 双电源快速切换事件过程仿真分析[J]. 电源技术, 2012, 36(10): 1552-1555.

FU Ying-jie, LIANG Zhi-shan. Event simulation analysis of fast speed transfer process in double electric power supplies[J]. Power Sources, 2012, 36(10): 1552-1555.

[6] 李建军, 吴政球, 谭勋琼, 等. 风力发电及其技术发展综述[J]. 电力建设, 2011, 32(8): 64-72.

LI Jun-jun, WU Zheng-qiu, TAN Xun-qiong, et al. Review of wind power generation and relative technology development[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(8): 64-72.

[7] 胡胜, 林新春, 康勇, 等. 一种双馈风力发电机在电网电压不平衡条件下的改进控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 21-29.

HU Sheng, LIN Xin-chun, KANG Yong, et al. An improved control strategy of doubly-fed induction generator under grid voltage unbalance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 21-29.

- [8] 王凤翔. 永磁电机在风力发电系统中的应用及其发展趋势[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 12-24.  
WANG Feng-xiang. Application and development tendency of PM machines in wind power generation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 12-24.
- [9] 蔚兰, 陈国呈, 曹大鹏, 等. 双馈感应风力发电机网侧变换器低电压穿越控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 37-43.  
YU Lan, CHEN Guo-cheng, CAO Da-peng, et al. Low voltage ride through control strategy of grid side converter for double-fed induction generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 37-43.
- [10] 胡立锦, 张新燕, 刘东强, 等. 自备投含风电时和常规能源不同自备投的考虑[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 120-124.  
HU Li-jin, ZHANG Xin-yan, LIU Dong-qiang, et al. Consideration of power supply automatic switching device with wind power or different types with conventional energy[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(14): 120-124.
- [11] 孙鸣, 许航. 含分布式电源接入的变电站自备投应用问题[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(4): 144-146.  
SUN Ming, XU Hang. Application of automatic bus transfer in substation with DG connected[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(4): 144-146.
- [12] 冯小兰, 李杰, 苗世华, 等. 新型电源快速切换装置在工业企业变电站的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 139-142.  
FENG Xiao-lan, LI Jie, MIAO Shi-hua, et al. Application of high-speed bus transfer device in industrial substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 139-142.
- [13] 李海燕. 风力发电无功补偿技术及发展趋势[J]. 宁夏电力, 2009(4): 59-62.  
LI Hai-yan. Discussion on reactive power compensation technology and its development trend of wind power generation[J]. Ningxia Electric Power, 2009(4): 59-62.
- [14] 苗世华, 李杰, 宗洪良. 工业企业电源快速切换装置在低压母线的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 76-79.  
MIAO Shi-hua, LI Jie, ZONG Hong-liang. Application of industrial enterprises power quick-switching device in the low-voltage bus[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 76-79.

收稿日期: 2013-05-15; 修回日期: 2013-06-14

作者简介:

卜繁多(1988-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统保护与控制;

梁志珊(1958-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统控制与稳定、非线性控制、电力电子技术; E-mail: lzs1960@cup.edu.cn

夏鹏程(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统及其自动化。