

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240526

基于模型校核的静止变频器采样值差动保护原理

张大海¹, 李宇欣¹, 李猛¹, 刚玉阳¹, 周健², 李小鹏³

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 国网新能源控股有限公司抽水蓄能技术经济研究院, 北京 100761;
3. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 静止变频器(static frequency converter, SFC)是抽水蓄能电站大型同步机组启动过程的重要设备。在抽蓄机组启动的过程中, 由于 SFC 机、网两侧电流频率不一致, 使得基于工频相量的常规差动保护配置困难, 且现有保护方案在速动性和可靠性上存在不足。为解决上述问题, 提出了一种基于模型校核的 SFC 采样值差动保护原理。首先充分研究 SFC 的工作原理和控制策略, 并基于电流采样值在时域内构建符合 SFC 工作原理的数学模型, 然后采用模型校核的方法寻找故障前后差异并提出相应的保护判据。最后, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建抽蓄机组 SFC 启动的电磁暂态仿真模型, 验证所提保护原理的有效性。仿真结果表明, 所提保护原理不受 SFC 两侧不同频率的干扰, 具有良好的选择性、速动性和可靠性。

关键词: 抽水蓄能; 静止变频器; 模型校核; 电流采样值; 差动保护

Principle of sampled value differential protection of static frequency converters based on model verification

ZHANG Dahai¹, LI Yuxin¹, LI Meng¹, GANG Yuyang¹, ZHOU Jian², LI Xiaopeng³

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Pumped-storage Technological & Economic Research Institute, State Grid Xinyuan Company Ltd., Beijing 100761, China;
3. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: Static frequency converter (SFC) is an important piece of equipment for the startup process of large synchronous units in pumped storage power plants. In the process of startup, the different current frequencies on both sides of the SFC make it difficult to configure the conventional differential protection based on power frequency phasors. Additionally, the existing protection schemes have deficiencies in terms of speed and reliability. To address these problems, this paper proposes a sampled value differential protection principle for an SFC based on model verification. First, the operating principles and control strategies of an SFC are thoroughly studied, and a mathematical model that aligns with the SFC's working principles is constructed in the time domain using current sampled values. Then, a model verification method is applied to identify differences before and after a fault, and the corresponding protection criteria are established. Finally, an electromagnetic transient simulation model of the pumped storage unit's SFC startup is built in PSCAD/EMTDC to verify the effectiveness of the protection principle. Results show that the proposed protection principle is not affected by the frequency differences on both sides of the SFC, and exhibits excellent selectivity, fast response, and reliability.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5419-202243074A-1-1-ZN).

Key words: pumped storage; static frequency converter (SFC); model verification; current sampled value; differential protection

0 引言

为实现“双碳”目标, 构建新型电力系统和新

型能源体系, 大量可再生能源并网运行, 具有较大的间歇性、随机性和波动性^[1-4]。因此, 迫切需要提高基于储能技术的电力系统平衡控制^[5-7]。抽水蓄能技术仍然是当前乃至未来一段时期内最经济、有效的手段^[8-11]。抽水蓄能电站是电力系统的绿色灵活可调节电源, 其运用方式灵活, 负荷调节快速, 对

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助 (5419-202243074A-1-1-ZN)

电网的稳定运行和调节起到重要作用^[12-14]。

抽蓄机组多采用大型同步电机，在抽水启动工况下，同步电机工作在电动机模式，需要有外部电源传输功率方可启动。抽蓄机组多采用静止变频启动的方式将机组平稳、可靠地启动，以减少机组启动和并网时对电网的干扰和冲击，静止变频器(static frequency converter, SFC)是抽蓄机组静止变频启动的核心装置^[15]。SFC 系统在抽蓄机组抽水启动过程的控制策略较为复杂，需要实现不同的换相控制方式及切换，并与同步电机的控制策略互相配合^[16]。长期以来，SFC 系统控制技术一直为国外所垄断，直到 2012 年，南瑞继保首次实现了 SFC 系统国产化研制，拥有完全自主知识产权的国产静止变频启动系统在江苏沙河抽水蓄能电站投运。

虽然 SFC 只在抽蓄机组启动过程运行，但在实际工程中，抽蓄机组每日要启动数次，且启动时间较长，因此，可靠、完善的保护性能对于 SFC 的安全稳定运行及抽蓄机组启动的成功率具有重要作用^[17]。由于 SFC 变流桥机、网两侧频率不一致，基于工频相量的差动保护配置困难。在进口 SFC 设备中，除法国 ALSTOM 公司的产品外，其余产品均未对 SFC 变流桥本体配置相应的保护方案^[18]。文献[18]介绍了一种变频差动保护方案，其核心思想是将机桥侧的变频电流校正为工频，再与网桥侧的电流形成差动保护，其具体实施方案并未详细介绍，且该保护原理在频域中进行转化，在保护速动性上有待提高。文献[19]提出了一种基于电流有效值的差动保护原理，推导出 SFC 机、网两侧电流频率不同，但有效值相同，提出了基于过零点来判断周期提取电流幅值的差动保护算法。但实际工程中，SFC 机桥侧电流在换相时存在一定的波动性，若受噪声等干扰信号的影响，其在每一次周期性变化时可能存在多个过零点的现象，影响该保护算法的可靠性。且上述研究在 SFC 断续换流阶段均需要闭锁，无法保护 SFC 启动全程。文献[20]利用机、网两侧电流的瞬时一致性，提出了一种适用于调相机 SFC 机桥误触发故障的瞬时变频差动保护，但其具体实现方式、理论依据推导及保护判据设置并未明确。由于 SFC 控制策略复杂，保护配置困难，目前国内外在此方面的研究资料较少，上述研究在可靠性和速动性等方面均存在一定的不足，亟须研究提升保护性能的 SFC 保护新原理。本文提出一种基于模型校核的 SFC 采样值差动保护原理，不仅能够弥补现有保护在速动性、可靠性上的不足，且能够实现在 SFC 启动全过程均可靠、快速动作。

1 SFC 工作原理

如图 1 所示为 12-6 脉波高-低-高型 SFC 的拓扑结构，其主要包含输入变压器、隔离开关、12 脉波晶闸管整流器、平波电抗器、6 脉波晶闸管逆变器、输出变压器等。与 6-6 脉波 SFC 相比，12-6 脉波拓扑结构可以有效减少谐波次数，简化滤波装置^[21]。

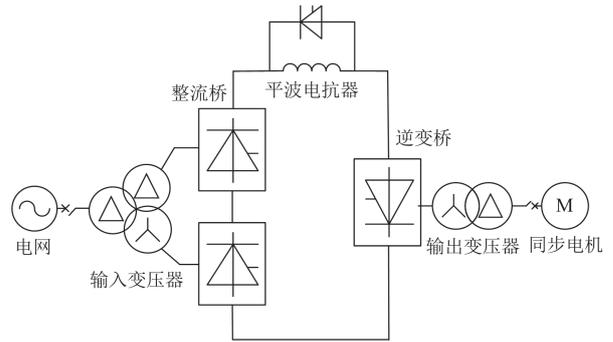


图 1 12-6 脉波 SFC 拓扑结构

Fig. 1 The 12-6 pulse SFC topology

SFC 通过网桥侧的整流器将电网侧的工频三相交流电变为直流，经平波电抗器后，再经机桥侧的逆变器将其逆变为通入同步电机定子的交流电，控制电机转速平稳上升，使电机侧频率逐渐达到工频，将电机平稳地由 0 转速慢慢拖动上升至额定转速。

SFC 整流侧采用转速-电流双闭环控制系统，逆变侧的换相控制策略又分为断续换流控制和自然换流控制两个阶段^[22]。在抽水蓄能机组的启动初期，由于同步电机处于低转速状态，其产生的反电动势不足以为 SFC 逆变侧晶闸管提供必要的换相电压。所以，当机组转速低于其额定转速的 10%时，逆变侧换流器需采用强迫换相的控制策略来控制晶闸管的导通和关断，这一阶段也称为断续换流阶段。当电机转速达到 10%额定转速时，同步电机可以感应出较大的机端反电动势，此时可以利用电机的反电动势将逆变侧晶闸管顺利关断，这个阶段叫做自然换流阶段。

SFC 变流桥网桥侧交流线路故障会产生较大短路电流，直流侧发生极间短路故障、直流电流跌落，均可能破坏 SFC 功率传输，导致机组启动时间延长甚至启动失败；换流桥桥臂晶闸管发生短路故障可能导致同一换流桥内其他两相桥臂晶闸管也被击穿，严重危害 SFC 的安全稳定运行并影响抽蓄机组的启动成功率。因此，当发生上述短路故障时，应当有相应的保护快速、可靠动作。除此之外，SFC 逆变桥还可能发生换相失败，当发生单次换相失败

时, 若晶闸管可恢复正确导通顺序, 则不会对 SFC 的运行造成较大影响, 保护无须动作; 若发生连续换相失败引发桥臂直通故障, 其等效电路相当于将换流桥正负极短接, 严重危害 SFC 的运行安全, 此时应当有适当的保护措施将故障切除, 维护设备安全。

2 基于模型校核的采样值差动保护

深入挖掘 SFC 在正常运行工况下所遵循的物理规律, 构建能够全面反映 SFC 工作原理的数学模型作为其参考模型, 将实际运行的物理模型参数与参考模型计算所得参数进行对比。无故障时, 实际模型应当与参考模型一致; 故障发生后, 由于故障支路的存在, 实际模型与参考模型无法匹配^[23]。基

于上述原理, 本节将构建基于模型校核的采样值差动保护原理。

2.1 参考模型构建

在 SFC 正常启动工况下, 任意给定时刻, 同一变流桥内同一相位上的晶闸管在上下桥臂间有且仅有一个呈导通状态, 换相时刻也不例外。因此, 流经机、网两侧的直流电流可以基于 SFC 晶闸管的导通机制来推导计算。通过分析交流侧三相电流的流向, 可以推导出在任意时刻基于交流侧电流采样值的机侧和网侧的等效直流电流表达式。

图 2 为 12-6 脉动 SFC 变流桥的拓扑结构。本节将以具体的拓扑结构为例, 进行 SFC 数学参考模型的构建与理论推导。

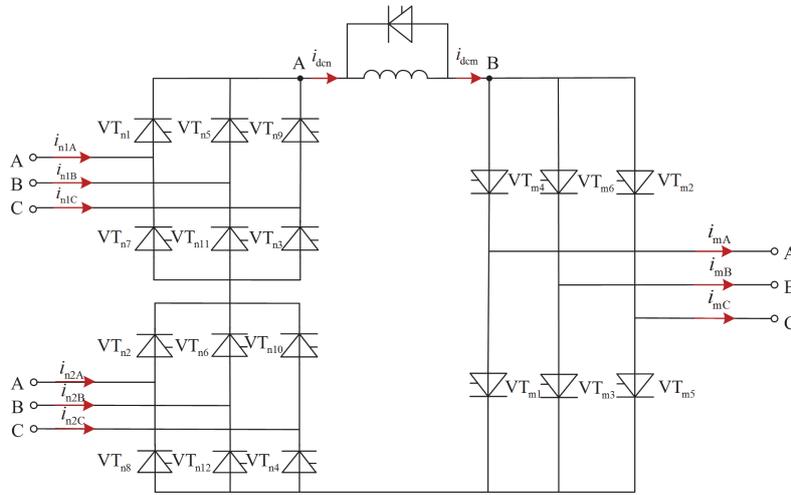


图 2 12-6 脉波 SFC 变流桥拓扑结构

Fig. 2 Topology of 12-6 pulse SFC converter bridge

如图 2 所示, 规定以抽蓄机组启动时的功率传输方向为正方向, 即采集到的电流从网侧流向机侧传输定义为正, 可以根据交流侧电流采样值的正负, 结合晶闸管的单向导通特性, 判断该采样时刻的直流侧电流瞬时值。以 A 相为例, 当网桥侧电流采样值为正时, 其流过整流桥 VT_{n1} 桥臂支路, 当网桥侧电流采样值为负时, 无电流流过 VT_{n1} 桥臂支路。上述规律可表达为

$$\begin{cases} i_{VT_{n1}}(t) = i_{nA}(t), i_{nA}(t) \geq 0 \\ i_{VT_{n1}}(t) = 0, i_{nA}(t) < 0 \\ i_{VT_{n5}}(t) = i_{nB}(t), i_{nB}(t) \geq 0 \\ i_{VT_{n5}}(t) = 0, i_{nB}(t) < 0 \\ i_{VT_{n9}}(t) = i_{nC}(t), i_{nC}(t) \geq 0 \\ i_{VT_{n9}}(t) = 0, i_{nC}(t) < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i_{VT_{nk}}(t)$ 为流过 SFC 网桥侧晶闸管 $VT_{nk}(k =$

1, 5, 9) 的等效电流瞬时值, k 为 SFC 网桥的上桥臂编号; $i_{nA}(t)$ 、 $i_{nB}(t)$ 、 $i_{nC}(t)$ 为网桥侧三相交流电流的采样值。

同理, 可根据机桥侧交流电流采样值的正负判断流过逆变桥晶闸管上桥臂的电流情况。同样以 A 相为例, 当机桥侧电流采样值为正时, 其流过 VT_{m4} 桥臂支路, 当机桥侧电流采样值为负时, 无电流流过 VT_{m4} 桥臂支路, 上述规律可表达为

$$\begin{cases} i_{VT_{m4}}(t) = i_{mA}(t), i_{mA}(t) \geq 0 \\ i_{VT_{m4}}(t) = 0, i_{mA}(t) < 0 \\ i_{VT_{m6}}(t) = i_{mB}(t), i_{mB}(t) \geq 0 \\ i_{VT_{m6}}(t) = 0, i_{mB}(t) < 0 \\ i_{VT_{m2}}(t) = i_{mC}(t), i_{mC}(t) \geq 0 \\ i_{VT_{m2}}(t) = 0, i_{mC}(t) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i_{VT_{mj}}(t)$ 为流过 SFC 机桥侧晶闸管 $VT_{mj}(j =$

2,4,6)的等效电流瞬时值, j 为 SFC 机桥的上桥臂编号; $i_{mA}(t)$ 、 $i_{mB}(t)$ 、 $i_{mC}(t)$ 为网桥侧三相交流电流的采样值。

B 相、C 相的电流流向规律与 A 相相同。

根据基尔霍夫电流定律, 在任何节点处, 所有流入节点的电流之和等于所有流出节点的电流之和。对于图 2 中的 A、B 节点, 有式(3)所示的 KCL 方程。

$$\mathbf{i}_{dc} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{i}_{VT} \quad (3)$$

$$\mathbf{i}_{dc} = \begin{pmatrix} i_{dcn}(t) \\ i_{dcm}(t) \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{i}_{VT} = \begin{pmatrix} i_{VTn1}(t) \\ i_{VTn5}(t) \\ i_{VTn9}(t) \\ i_{VTn2}(t) \\ i_{VTn4}(t) \\ i_{VTn6}(t) \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中: \mathbf{i}_{dc} 为 SFC 变流桥的等效直流电流矩阵; \mathbf{B} 为关联矩阵; \mathbf{i}_{VT} 为桥臂等效电流矩阵; $i_{dcn}(t)$ 、 $i_{dcm}(t)$ 分别为 SFC 网桥侧和机桥侧的等效直流电流瞬时值表达式; $i_{VTnk}(t)$ 、 $i_{VTnj}(t)$ 分别为流过 SFC 网桥和机桥上桥臂的等效电流瞬时值。

在 SFC 正常静止变频启动工况下, 应当有

$$i_{dcn}(t) = i_{dcm}(t) \quad (7)$$

综上, 联立式(1)~式(3)和式(7)即可构建 SFC 的数学参考模型, 该模型严格遵循了 SFC 变流桥本体的工作原理和物理规律。该模型的构建不仅体现了静止变频启动过程中各电气量之间的相互关联性, 而且确保了对 SFC 变流桥核心物理规律的全面遵循和准确反映, 且在抽蓄机组静止变频启动的全阶段均适用。

2.2 保护判据设计

利用机、网两侧等效直流电流差值的绝对值构造差动电流 i_d 的表达式, 如式(8)所示。

$$i_d = |i_{dcn}(t) - i_{dcm}(t)| \quad (8)$$

结合 2.1 节所构建的参考模型可知, SFC 在正常工作状态下, 机、网两侧的直流电流值应相等。由于故障后会产生新的支路, 所构建的 SFC 正常工作下的参考模型被破坏, 会导致计算出的直流电流产生一定的差流, 可设定基于模型校核法的采样值

差动保护动作判据, 如式(9)所示。

$$i_d > i_{set} \quad (9)$$

式中, i_{set} 为保护整定值。

考虑 SFC 在启动过程中存在瞬时脉冲及不平衡电流等因素的干扰, 所计算的等效差动电流存在一定的波动性, 基于电流采样值的差动保护不能依赖于单一采样值的判别结果, 需遵循“R 取 S”原则进行连续多个采样时刻的判别^[24], 如式(10)所示。

$$\begin{cases} S \geq \frac{45+45}{360} \times \frac{T}{T_s} + 1 \\ R \geq S + 2 \end{cases} \quad (10)$$

式中: T/T_s 由采样频率决定, 为一个工频周期内采集信号的个数; R 为连续采样判别的次数; S 为符合保护动作条件的判别次数。

结合理论计算及大量 SFC 故障仿真实验结果, 在本文所提保护原理中, R 取 30, S 取 21; 考虑故障响应时间及电流互感器测量误差, 保留一定裕度, i_{set} 设定为 SFC 正常工作时直流电流最大值的 10%。

2.3 保护方案流程

图 3 所示为 SFC 采样值差动保护的构成电流及接线方式, 取 SFC 机、网两侧的三相交流电流采样值, 经一定的保护算法计算得到等效差动电流, 若差动电流大于保护动作门限值且满足“R 取 S”原则, 与门输出为 1, 进入跳闸环节。

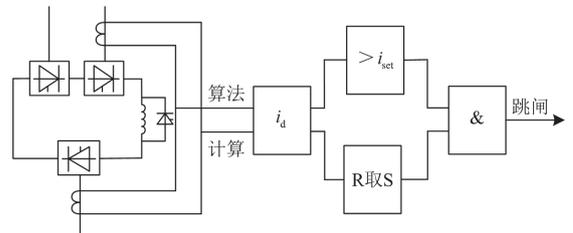


图 3 SFC 采样值差动保护构成电流及接线方式

Fig. 3 SFC sampling value differential protection composition current and wiring method

利用电流采样值, 在时域内直接进行保护算法的计算, 有效解决了 SFC 机、网两侧电流频率不一致导致的基于工频相量的常规差动保护难以配置的问题。

根据 2.1 节和 2.2 节对保护原理的构建与分析, 基于模型校核的 SFC 采样值差动保护方案具体实现流程如下。

1) 保护启动后, 首先进行数据采集, 采集故障后 SFC 机、网两侧的交流三相电流。

2) 根据所建立的参考模型, 计算基于电流采样值的等效差动电流。

3) 连续计算 30 个采样点内的等效差动电流, 并判断是否在“R 取 S”原则下满足保护动作判据。

4) 若满足所提保护动作判据, 判定为区内故障, 保护动作; 若不满足保护动作判据, 则判定为区外故障, 保护返回。

保护方案流程图如图 4 所示。

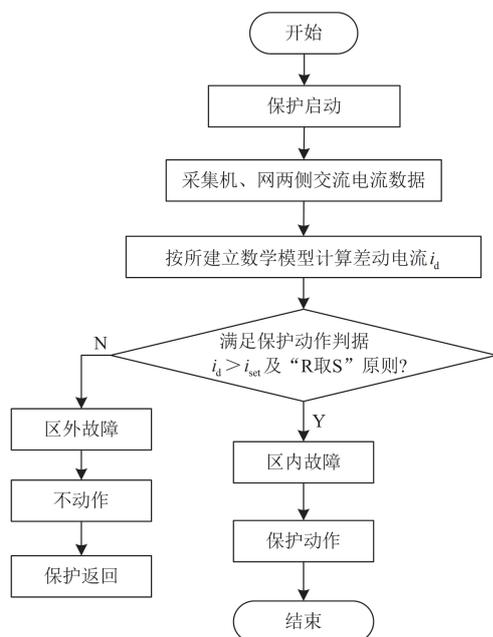


图 4 保护方案流程图

Fig. 4 Protection scheme flow chart

3 影响因素分析

3.1 小电流接地系统单相接地故障

在断续换流阶段, 由于输出变压器未接入系统, 同步电机接地方式为高阻接地, 此时 SFC 属于小电流接地系统。当发生交流侧单相接地故障或直流侧单极接地故障时, 高阻接地方式将限制故障电流的大小, 对系统的直接危害也较小。所以在一定的裕度下, SFC 可以在单相接地故障条件下持续运行, 不中断供电, 在此故障场景下保护无须动作。

3.2 区外相间短路引起换相失败

SFC 断续换流阶段, 逆变侧换相方式为强迫换相法, 它将会给定晶闸管开通及关断的触发信号, 因此鲜少出现换相失败的情况。而在自然换流阶段, 由于交流侧相间短路等故障可能引起逆变桥失去换相电压, 从而导致换相失败。当单次换相失败发生后, 若晶闸管能恢复换相导通, 则保护无须动作; 若发生连续换相失败导致逆变桥同一相上下桥臂晶闸管同时导通, 此时 SFC 换流桥正负极被短接, 引起的短路电流会产生较大的危害。因此, 当发生连

续换相失败导致桥臂直通时, 保护应当动作。

3.3 不平衡电流

常规差动保护中, 为避免电流互感器激磁电流等因素而产生的不平衡电流影响, 常采用比率制动等方法, 防止不平衡电流引起的保护误动。基于电流相量的常规差动保护, 在稳态情况下, 其差动电流、制动电流、不平衡电流均为一个确定值, 但采样值差动保护使用的采样值具有时变特性, 即对于每一个采样点, 其制动特性都不相同^[24]。为保证采样值差动保护的制动性能不低于常规差动保护, 采样值差动保护的判据设置除动作电流外, 还需遵循“R 取 S”原则增加辅助判据, 从而最大程度地避免不平衡电流的影响。

3.4 过渡电阻

系统发生非金属性故障时, 过渡电阻的存在会使故障后产生的短路电流发生变化, 同时也会在一定程度上影响所提保护原理计算出的等效差动电流的大小。但过渡电阻的存在并不会影响以正常启动工况构建的参考模型, 故障发生后产生新的故障支路, 依然会导致实际工况物理模型与参考模型不匹配。因此, 所提基于模型校核的保护算法理论上能够耐受一定程度的过渡电阻。

3.5 噪声干扰

在实际工程应用中, 噪声干扰是客观存在且无法避免的。在测量元件采样过程中, 噪声干扰会在一定程度上影响通过参考模型所计算出的等效差动电流。本文保护原理在动作判据设置时保留一定裕度, 且连续判断多个采样点数值。因此, 所提保护算法能够耐受正常范围内的噪声干扰。

3.6 断续换流阶段 CT 传变

在断续换流阶段, 所提保护原理依然适用, 但由于启动初期电流幅值较低, 可能影响电磁式电流互感器的正确传变, 可以考虑加装光电式互感器以确保在断续换流阶段依然能够正常采集到交流侧电流值。

3.7 采样频率

在本文保护算法中, 理论上采样频率越高, 等效差动电流计算越精确。但综合考虑目前实际工程中的系统装置硬件水平及保护所需的计算精度和动作速度, 设置采样频率为 4 kHz, 进行仿真验证。

4 仿真实验

在 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建抽蓄机组静止变频启动电磁暂态仿真模型。本仿真模型以国内某抽水蓄能电站工程参数为基础进行完善搭建, 同步电机额定容量为 333.3 MVA, 额定功率为 300 MW, 额定电压为 18 kV, SFC 额定电压为 6 kV。如图 5

所示，在 SFC 变流桥本体分别设置交流侧、直流侧及桥臂处的不同故障，其中 F5、F6 为交流侧区外故障。结合 2.2 节保护判据设计方法及仿真模型参数，保护动作定值设置为 0.18 kA。由于 SFC 不同启动阶段控制策略不同，本节将在断续换流阶段和自然换流阶段分别进行保护原理的验证。

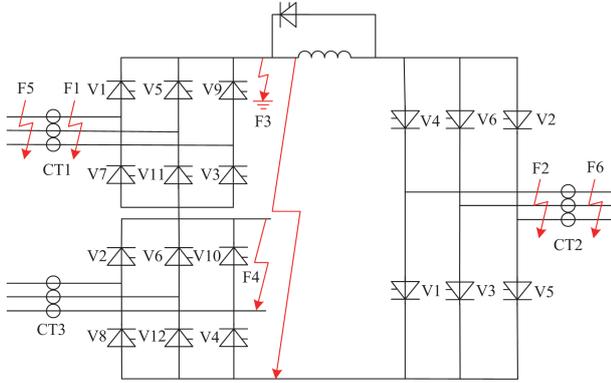


图 5 SFC 变流桥本体故障位置图

Fig. 5 Fault location diagram of SFC converter bridge body

4.1 区内故障

所搭建的电磁暂态仿真模型中，SFC 在 0.5~2.3 s 时段内处于断续换流阶段，以典型故障场景进行分析，在第 1 s 时在 F2 处设置区内交流侧短路故障，其等效差动电流的仿真结果和保护判别结果如图 6 所示。仿真结果表明，故障前按所建立参考模型计算出的等效差动电流近似为 0，故障后由于产生新的故障支路，实际工程模型与参考模型不再匹配，会迅速产生较大的等效差动电流。

由于 SFC 机桥侧在启动初期电流幅值较低，在故障发生初始时刻计算出的等效差动电流幅值较低。但随着故障电流的上升，基于电流采样值的等效差动电流持续上升，按照设定的保护判据，在故障发生后 13.5 ms 保护可以正确动作。

SFC 在第 2.5~66 s 时段内处于自然换流阶段，在 SFC 直流侧设置双极短路故障，故障发生时刻为 10 s，仿真结果如图 7 所示，可见在自然换流阶段 SFC 发生直流侧双极短路故障，保护在故障发生后 7.0 ms 即可正确动作。

4.2 区外故障

在 F6 处设置区外交流侧短路故障，仿真验证保护算法的可靠性。设定 1 s 时在 SFC 发生区外交流侧两相短路接地故障，等效差动电流计算结果如图 8 所示。由仿真结果可见，区外故障并不影响所建立参考模型与实际工程物理模型的一致性，等效差动电流基本为 0，远小于保护设定的动作门槛，

保护不会误动。

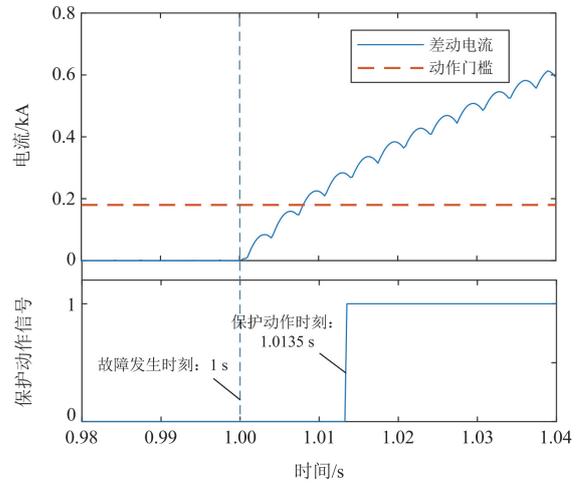


图 6 断续换流阶段机桥侧发生 ABG 故障仿真结果

Fig. 6 Simulation results of ABG fault on the bridge side during intermittent commutation

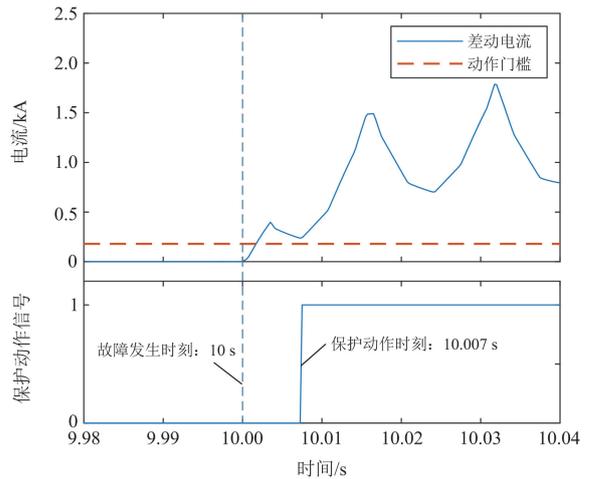


图 7 自然换流阶段直流侧发生双极短路故障仿真结果

Fig. 7 Simulation results of bipolar short-circuit fault on DC side during natural commutation

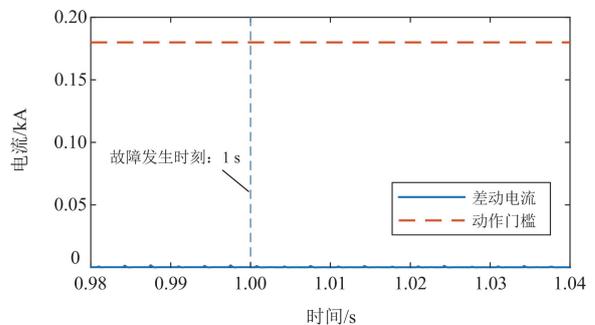


图 8 F6 处发生 ABG 故障仿真结果

Fig. 8 Simulation results of ABG fault occurring at F6

4.3 特殊故障场景分析

本文保护方案中, 当发生交流侧区外三相短路故障并经过一定的故障响应时间后, 也可能产生一定幅度的等效差动电流, 其原因是逆变桥交流侧发生相间短路, 使逆变器失去两相换相电压, 导致 SFC 发生换相失败。由 3.2 节分析可知, 单一换相失败发生后, 若 SFC 桥臂晶闸管可恢复正常导通, 则不会给正常运行带来较大的影响, 且此时实际模型与参考模型依然相符, 保护不会动作。若发生连续换相失败导致换流桥单相桥臂直通, 相当于 SFC 直流侧正负极被短接, 此时实际工况不满足本保护方案所建立的参考模型, 则会产生相应的等效差动电流。在机桥侧 F6 处设置三相短路故障, 故障发生时间为 30 s, 其仿真结果如图 9 所示, 可见等效差动电流在桥臂直通故障发生后可以满足保护动作判据, 所提保护能够识别出换相失败所导致的桥臂直通故障, 有效避免了该故障下可能给设备带来的危害。

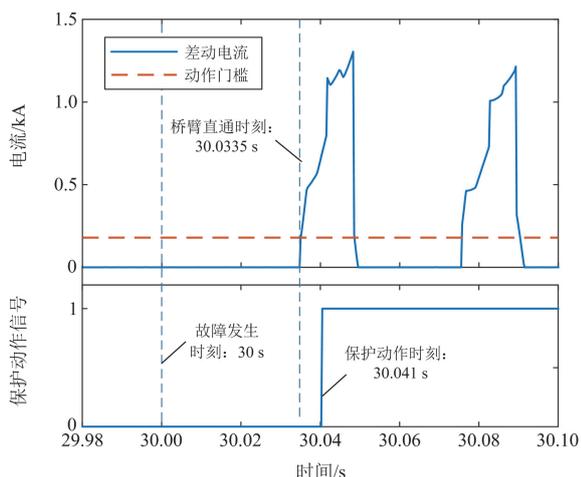


图 9 区外发生三相短路故障引起换相失败仿真结果

Fig. 9 Simulation results of phase commutation failure caused by three-phase short circuit fault outside the zone

由 3.1 节分析可知, 发生区内交流侧单相接地故障或直流侧单极接地故障时, 系统中流过的故障电流较小, 并不影响系统的正常运行, 故断续换流阶段下该故障类型不在本保护考虑范围内。

在该故障场景下进行仿真验证, 第 1 s 时 F2 处发生单相接地故障, 保护判别结果如图 10 所示。其等效差动电流无法达到差动电流的动作门槛值, 保护不会误动。

综上, 所提保护算法可以在 SFC 启动全阶段快速进行故障判别, 有效保护 SFC 设备运行安全。经过大量仿真计算验证, SFC 在断续换流阶段及自然换流阶段发生区内故障的保护动作时间如表 1 所

示。由仿真结果可知, 针对 SFC 区内不同故障位置发生的不同金属性故障, 所提保护方案均能够在 15 ms 内快速动作, 最快动作时间 5.25 ms, 大大提高了保护的速动性。

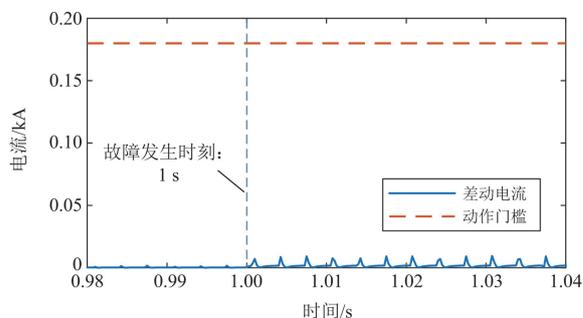


图 10 断续换流阶段发生 AG 故障仿真结果
Fig. 10 Simulation results of AG fault during intermittent commutation

表 1 不同换相阶段下保护动作时间

Table 1 Protection action time in different phase commutation stages

故障位置	动作时间/ms	
	断续换流阶段	自然换流阶段
F1	AG	—
	AB	5.25
	ABG	5.75
	ABC	5.25
F2	AG	—
	AB	13.5
	ABG	13.5
	ABC	13.75
F3	单极接地	—
	双极短路	13.5
F4	桥臂短路	12.75

4.4 耐过渡电阻能力

SFC 在不同故障位置下耐受过渡电阻能力不同。在机组启动的过程中, 机桥侧的电流频率及幅值均从零开始逐渐爬升至其额定值, 该过程中机桥侧电流保持在较低水平。因此在一定过渡电阻下, 其故障电流幅值上升程度有限, 此故障位置下耐受过渡电阻能力略差于其他故障位置。以自然换流阶段为例, 故障发生时刻为第 10 s, 在机桥侧发生区内交流故障时设置 3 Ω 过渡电阻, 网桥侧、直流侧及换流桥桥臂处分别设置 5 Ω 过渡电阻。表 2 为不同故障位置下经过渡电阻发生故障后的保护仿真结果。仿真结果表明, 在一定的过渡电阻下, 所提保护原理依然可以准确动作, 具有一定的耐过渡电阻能力。

表 2 耐过渡电阻能力仿真结果

Table 2 Simulation results of transition resistance capacity

故障位置	故障类型	过渡电阻/ Ω	故障判别	动作时间/ms
F1	AG	5	区内	10.2
	AB		区内	9.5
	ABG		区内	9.5
	ABC		区内	7.5
F2	AG	3	区内	9.0
	AB		区内	9.0
	ABG		区内	9.0
	ABC		区内	9.5
F3	单极接地	5	区内	7.5
	双极短路		区内	6.8
F4	桥臂短路	5	区内	14.5

4.5 抗噪性能验证

为验证所提保护原理的抗噪声干扰能力，以自然换流阶段为例，在所采集的 SFC 机、网两侧的三相交流电流中分别加入信噪比为 30 dB 的高斯白噪声。仿真结果表明，30 dB 噪声干扰下，保护依然可以准确判别区内外故障并快速、准确动作，区外故障场景下保护不会误动，该保护方案具有较强的抗噪声干扰能力。仿真结果如表 3 所示。

表 3 含噪声干扰的仿真结果

Table 3 Simulation results with noise interference

故障位置	故障类型	信噪比/dB	故障判别	动作时间/ms
F1	AG	30	区内	9.5
	AB		区内	5.5
	ABG		区内	7.0
	ABC		区内	5.5
F2	AG	30	区内	8.3
	AB		区内	8.7
	ABG		区内	8.3
	ABC		区内	8.3
F3	单极接地	30	区内	6.8
	双极短路		区内	7.2
F4	桥臂短路	30	区内	13.0
F5	AG	30	区外	—
	AB		区外	—
	ABG		区外	—
	ABC		区外	—
F6	AG	30	区外	—
	AB		区外	—
	ABG		区外	—
	ABC		区外	—

5 保护方案对比

目前，国内南京南瑞继保有限公司所研发的 SFC 变频差动保护，其保护算法是在频域中进行电流的转化计算，需要的动作时间为 30 ms^[18]。由第 4 节仿真结果可知，本文所提保护方案针对保护区内所有故障位置下的不同故障均可在 15 ms 内准确、快速动作，相比变频差动保护，所提保护方案动作速度提升一倍，有效提高了 SFC 保护方案的速动性。

基于电流有效值的差动保护以理想化电流波形为基础进行电流有效值推导，通过判断过零点的方式建立变频电流的周期算法^[19]。由于 SFC 机桥侧电流在换相时刻存在一定的波动性，其每一次周期变化时可能存在多个过零点，在信号采样过程中的若出现噪声干扰，电流波动将更大，可能在一个周期内出现更多额外的过零点，从而导致保护算法误判电流周期，影响保护的可靠性。本文所提保护方案无须人为设定算法来判定变频电流的电流周期，无须忽略换流时刻将电流波形做理想化等效，且具有良好的抗噪性能，提高了保护的可靠性。

电流变化率保护虽然具有较高的灵敏度，但在实际工程中多次发生误动^[18]。本文所提保护在设置保护动作判据时遵循“R 取 S”原则，不依赖单一时刻的保护判别结果，与电流变化率保护相比，大大降低了保护误动的概率，具有更高的可靠性。

除此之外，本文所提保护在 SFC 断续换流阶段仍然适用，能够在 SFC 启动的全程做到快速、准确、可靠动作。表 4 为本文所提保护原理与现有保护方案的对比总结。

表 4 保护方案对比

Table 4 Comparison of protection schemes

保护方法	是否需要时频转换	是否需要理想化等值	保护可投入阶段	速动性	可靠性
变频差动保护	是	否	自然换流	低	高
幅值差动保护	否	是	自然换流	低	低
电流变化率保护	否	否	自然换流	高	低
本文所提保护	否	否	全阶段	高	高

6 结论

针对 SFC 现有保护方案速动性有待提高、可靠性不高等问题，本文提出了一种基于模型核校的 SFC 采样值差动保护新原理，所得研究结论如下。

1) 保护算法完全在时域内构建和计算，解决了 SFC 机、网两侧频率不一致导致的基于工频相量的常规差动保护配置困难的问题。

2) 本保护原理无须进行电流的时频转换，能够

在 15 ms 内准确做出故障判别, 较变频差动保护速度提升一倍, 提升了保护的速动性。

3) 本文在时域内构建的 SFC 数学参考模型, 无须对电流进行理想化等效, 不依赖人为设定的周期判定算法, 不依赖单一采样点的保护判别结果, 提高了保护的可靠性。

4) 所提保护原理在 SFC 启动全阶段均适用, 有效弥补了现有保护方案在 SFC 断续换流低频阶段需要闭锁的空白, 实现了 SFC 启动全阶段的保护。

参考文献

- [1] 刘天蔚, 边晓燕, 吴珊, 等. 电力系统碳排放核算综述与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 176-187.
LIU Tianwei, BIAN Xiaoyan, WU Shan, et al. Overview and prospect of carbon emission accounting in electric power systems[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 176-187.
- [2] KESAVAN P K, SUBRAMANIAM U, ALMAKHLES D J, et al. Modelling and coordinated control of grid connected photovoltaic, wind turbine driven PMSG, and energy storage device for a hybrid DC/AC microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(1): 154-167.
- [3] 唐西胜, 李伟, 沈晓东. 面向新型电力系统的储能规划方法研究进展及展望[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(9): 178-191.
TANG Xisheng, LI Wei, SHEN Xiaodong. Research progress and prospect of energy storage planning method for new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(9): 178-191.
- [4] 胡博, 谢开贵, 邵常政, 等. 双碳目标下新型电力系统风险评述: 特征、指标及评估方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(5): 1-15.
HU Bo, XIE Kaigui, SHAO Changzheng, et al. Commentary on risk of new power system under goals of carbon emission peak and carbon neutrality: characteristics, indices and assessment methods[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 1-15.
- [5] 王新宝, 葛景, 韩连山, 等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 172-179.
WANG Xinbao, GE Jing, HAN Lianshan, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 172-179.
- [6] 余鹏飞, 朱继忠, 熊小伏, 等. 基于储能的电力系统安全调控方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 173-186.
YU Pengfei, ZHU Jizhong, XIONG Xiaofu, et al. Regulating & control method of power system security based on battery energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 173-186.
- [7] LI Junhui, MU Gang, ZHANG Jiahui, et al. Dynamic economic evaluation of hundred megawatt-scale electrochemical energy storage for auxiliary peak shaving[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(3): 1-17.
- [8] 徐秋实, 施通勤, 井浩然, 等. 面向新型电力系统的输电网与分布式变速抽水蓄能联合规划[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 128-137.
XU Qiushi, SHI Tongqin, JING Haoran, et al. Joint planning of a transmission network and distributed variable speed pumped storage for a new power system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 128-137.
- [9] 刘飞, 车琰瑛, 田旭, 等. 新型电力系统下的抽水蓄能电站成本疏导机制: 综述与展望[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(7): 757-768.
LIU Fei, CHE Yanying, TIAN Xu, et al. Cost sharing mechanisms of pumped storage stations in the new-type power system: review and prospect[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 57(7): 757-768.
- [10] 邹金, 赖旭, 汪宁渤. 大规模风电并网下的抽水蓄能机组调频控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 564-572.
ZOU Jin, LAI Xu, WANG Ningbo. Study on control of pumped storage units for frequency regulation in power systems integrated with large-scale wind power generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 564-572.
- [11] 游文霞, 刘斌, 李世春, 等. 风电并网下的抽水蓄能鲁棒最优调频控制策略[J]. 中国电力, 2023, 56(5): 32-40.
YOU Wenxia, LIU Bin, LI Shichun, et al. Robust optimal frequency regulation control strategy for pumped storage in grid-connected wind power systems[J]. Electric Power, 2023, 56(5): 32-40.
- [12] 彭煜民, 王雪林, 刘德旭, 等. 考虑混蓄与纯蓄配置方式的水风光蓄互补系统调度运行对比研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 179-187.
PENG Yumin, WANG Xuelin, LIU Dexu, et al. Comparative research on the dispatching operation of a hydro-wind-solar-storage complementary system considering configurations with hybrid and pure pumped-storage hydropower plants[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 179-187.
- [13] 赵子文, 陈帝伊, 李建玲, 等. 五种抽蓄运行特点的区

- 域能源系统灵活性评估[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(18): 7103-7115.
- ZHAO Ziwen, CHEN Diyi, LI Jianling, et al. Flexibility assessment of regional energy systems considering five types of pumped storage with different operational characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18): 7103-7115.
- [14] 文劲宇, 周博, 魏利岫. 中国未来电力系统储电网初探[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 1-10.
- WEN Jingyu, ZHOU Bo, WEI Lishen. Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 1-10.
- [15] 王德顺, 杨波, 李官军, 等. 抽水蓄能机组无位置传感器静止变频器启动控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 114-119.
- WANG Deshun, YANG Bo, LI Guanjun, et al. A control strategy of static frequency converter start-up for pumped-storage power plants without position sensors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 114-119.
- [16] 周军. 抽水蓄能电站中 SFC 变频启动的若干特点[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(11): 99-101.
- ZHOU Jun. Variable-frequency starting of SFC in pumped storage power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(11): 99-101.
- [17] 王昕, 井雨刚, 王大鹏, 等. 抽水蓄能机组继电保护配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 66-70, 92.
- WANG Xin, JING Yugang, WANG Dapeng, et al. Research on configuration of protective relay for pumped storage power plant[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 66-70, 92.
- [18] 陈俊, 司红建, 周荣斌, 等. 抽水蓄能机组 SFC 系统保护关键技术[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 167-171.
- CHEN Jun, SI Hongjian, ZHOU Rongbin, et al. Key technologies of SFC system protection for pumped storage hydro unit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 167-171.
- [19] 郑涛, 于硕, 姜雪, 等. 基于电流有效值的静止变频器本体差动保护新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 93-99.
- ZHENG Tao, YU Shuo, JIANG Xue, et al. A novel SFC differential protection method based on current effective value[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 93-99.
- [20] 董艳博, 朱润秋, 侯凯, 等. 调相机静止变频器机桥误触发故障分析及变频差动保护[J]. 电气技术, 2020, 21(11): 114-118, 124.
- DONG Yanbo, ZHU Runqiu, HOU Kai, et al. Fault analysis and frequency conversion differential protection of machine bridge of synchronous compensator SFC system[J]. Electrical Technology, 2020, 21(11): 114-118, 124.
- [21] 陶大军, 戈宝军, 林鹏, 等. 发电电动机静止变频器启动低频运行阶段的谐波特性[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(36): 6450-6457.
- TAO Dajun, GE Baojun, LIN Peng, et al. Harmonics characteristics of generator/motor starting with static frequency converter during low frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(36): 6450-6457.
- [22] 戈宝军, 陶大军, 董传友, 等. 静止变频器启动抽水蓄能电机初始导通方案[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 147-154.
- GE Baojun, TAO Dajun, DONG Chuanyou, et al. Initial control scheme for pumped storage machine starting with SFC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 147-154.
- [23] 李猛, 宁家兴, 和敬涵, 等. 基于模型校核的柔性直流输电线路自适应重合闸方案[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(9): 191-199.
- LI Meng, NING Jiaying, HE Jinghan, et al. Adaptive reclosing scheme for flexible DC transmission line based on model verification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 191-199.
- [24] 陈德树, 马天皓, 刘沛, 等. 采样值电流差动微机保护的一些问题[J]. 电力自动化设备, 1996, 16(4): 3-8.
- CHEN Deshu, MA Tianhao, LIU Pei, et al. Problems in realization of microcomputer bases differential current protection by sampled values[J]. Electric Power Automation Equipment, 1996, 16(4): 3-8.

收稿日期: 2024-04-29; 修回日期: 2024-07-22

作者简介:

张大海(1973—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统监控与继电保护; E-mail: dhzhang1@bjtu.edu.cn

李宇欣(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 21121453@bjtu.edu.cn

李猛(1986—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: meng1@bjtu.edu.cn

(编辑 周金梅)