



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110474307 B

(45) 授权公告日 2021.07.27

(21) 申请号 201910817984.5

审查员 郑悦

(22) 申请日 2019.08.30

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 110474307 A

(43) 申请公布日 2019.11.19

(73) 专利权人 天津大学

地址 300072 天津市南开区卫津路92号

(72) 发明人 李永丽 杨子荷 宋金钊 孙广宇
曾亮 张云柯

(74) 专利代理机构 天津市北洋有限责任专利代理事务所 12201

代理人 程毓英

(51) Int.Cl.

H02H 7/26 (2006.01)

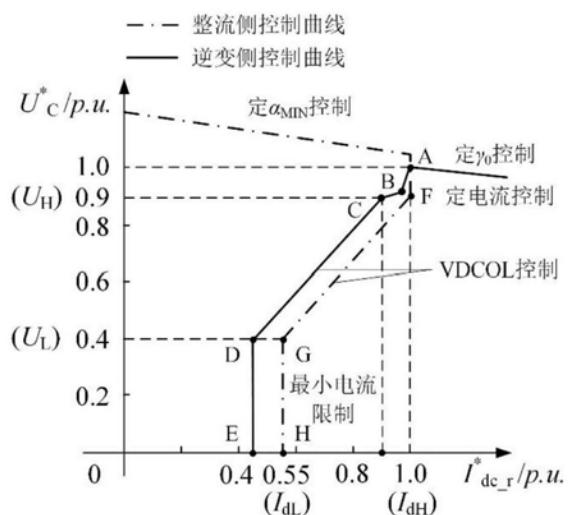
权利要求书1页 说明书5页 附图2页

(54) 发明名称

基于电流暂降检测的自适应故障分量电流差动保护方法

(57) 摘要

本发明涉及一种基于电流暂降检测的自适应故障分量电流差动保护方法,其步骤如下:设定自适应故障分量电流差动保护判据的参数,包括判据自适应调节启动整定系数和判据自适应比率制动系数;采集高压交直流互联系统中由直流系统注入逆变侧交流系统的电流;判断单相虚拟 α β 坐标系中的电流幅值 I_m 与保护自适应调节启动整定门槛值的关系,调整比率制动系数;判断高压交直流互联系统逆变侧交流线路是否发生区内故障。



1. 一种基于电流暂降检测的自适应故障分量电流差动保护方法,其步骤如下:

(1) 设定自适应故障分量电流差动保护判据的参数,包括判据自适应调节启动整定系数 m ;判据自适应比率制动系数 k'_{res} ;各参数的设定需兼顾保护动作的可靠性与灵敏性,同时判据性能应不受系统运行方式影响;

(2) 实时采集高压交直流互联系统中由直流系统注入逆变侧交流系统的电流,通过低通滤波器消除所采集到的电流中高频分量及噪声的干扰;将滤波后的电流变换到单相虚拟 $\alpha\beta$ 坐标系,进而得到该电流在 $\alpha\beta$ 坐标系中的电流幅值 I_m ;

(3) 判断单相虚拟 $\alpha\beta$ 坐标系中的电流幅值 I_m 与保护自适应调节启动整定门槛值 $m \cdot I_{mN}$ 的关系, I_{mN} 为系统正常运行时直流系统注入逆变侧交流系统的负荷电流幅值;若 $I_m < m \cdot I_{mN}$ 则将自适应故障分量电流差动保护判据中的比率制动系数调整为 k'_{res} ;若 $I_m > m \cdot I_{mN}$ 则保持保护判据中的原有比率制动系数 k_{res} 不变;

(4) 通过全周傅式算法提取流经逆变侧交流线路两端保护的电流的工频故障分量;计算得到自适应故障分量电流差动保护判据中的差动电流故障分量幅值 ΔI_{diff} 与制动电流故障分量幅值 ΔI_{res} ;

(5) 判断差动电流故障分量幅值 ΔI_{diff} 是否高于最大不平衡电流幅值 I_{set} ;若 $\Delta I_{diff} > I_{set}$ 则进一步判断 ΔI_{diff} 与制动电流故障分量幅值 ΔI_{res} 的关系;若在 $I_m < m \cdot I_{mN}$ 时, ΔI_{diff} 与 ΔI_{res} 之间满足 $\Delta I_{diff} > k'_{res} \cdot \Delta I_{res}$,或在 $I_m \geq m \cdot I_{mN}$ 时满足 $\Delta I_{diff} > k_{res} \cdot \Delta I_{res}$,则判断高压交直流互联系统逆变侧交流线路发生区内故障,自适应故障分量电流差动保护立即出口故障相保护动作; m 取值范围在(0.55,1)区间内; k'_{res} 取值范围在(0,0.5)区间内。

基于电流暂降检测的自适应故障分量电流差动保护方法

技术领域

[0001] 本发明涉及电力系统高压交直流互联电网控制与保护领域,尤其涉及一种基于电流暂降检测的交流线路自适应故障分量电流差动保护方法。

背景技术

[0002] 我国发电资源和用电需求的逆向分布特征决定了我国对于跨区域、远距离和大规模电能输送技术的需求,同时也促进了我国“西电东送、南北互供、全国联网”的电能输送格局的形成。高压交直流 (high voltage direct and alternating current, HVDC/AC) 互联电网传输容量大、建设成本低,因而广泛用于远距离电能输送以及跨区域电网间的连接。对于高压交直流互联电网的交流系统线路,目前工程实际中通常同时配备故障分量电流差动保护装置与全电流差动保护装置作为线路的主保护。其中,故障分量电流差动保护消除了负荷电流的影响,在发生区内故障时具有较高的速动性与灵敏性,因此主要用于高压交直流互联电网交流线路故障的快速隔离与恢复。

[0003] 高压交直流互联电网中,由交流系统故障所引发的直流系统调节,尤其是由逆变侧交流线路故障所引发的直流系统换相失败,将导致交流系统呈现复故障特征,进而对传统交流保护在高压交直流互联电网中的适应性造成影响。当逆变侧交流系统发生故障后,逆变侧换流母线电压将出现不同程度的跌落,进而导致直流系统发生换相失败,严重时甚至可能导致直流系统闭锁并造成功率传输中断。为防止直流系统发生换相失败,高压交直流互联电网的直流控制系统将对故障后的直流系统电流以及注入逆变侧交流系统的电流进行快速非线性调节从而防止发生换相失败的发生,这将对故障后瞬间动作的故障分量电流差动保护的动作性能造成影响,可能导致逆变侧交流线路发生区内故障时故障分量电流差动保护出现灵敏性下降甚至拒动的情况。作为高电压等级交流线路的主保护,故障分量电流差动保护动作性能的下降将导致交流系统故障进一步扩大,甚至对高压交直流互联电网的稳定运行造成冲击。

[0004] 针对高压交直流互联电网逆变侧交流线路主保护适应性不足的问题,国内外学者已开展相应研究。《Influence of HVDC Commutation Failure on Directional Comparison Pilot Protection of AC System》通过保护误动实例指出,高压交直流互联电网逆变侧交流系统故障将导致逆变侧换流母线电压跌落,进而引发逆变侧换流阀发生换相失败并造成交流线路纵联差动保护装置动作性能下降。《基于参数识别的纵联保护在交直流混联电网中的应用研究》结合仿真现象指出,高压交直流互联电网逆变侧交流系统发生故障后,其故障演化过程及故障期间所呈现的电气量特征均有别于纯交流系统,这将导致逆变侧交流线路故障分量电流差动保护出现区内故障时灵敏性下降甚至拒动的现象。该文献据此提出了一种适用于与直流系统间接相连的交流长线路参数识别纵联保护原理,该保护原理的性能与交流线路长度有关,当用于与直流系统直接相连、长度较短的交流线路主保护时,所提方法将出现速动性与灵敏性不足的现象。《HVDC换相失败暂态特性及其对差动保护的影响分析和对策》采用流经逆变侧交流线路两端保护的电流幅值比值构成了新的

电流差动保护原理,该方法解决了原有故障分量电流差动保护在逆变侧交流线路发生区内故障时灵敏性不足或发生拒动的问题,但所提原理的动作性能容易受到参数选择的影响,对于引发直流系统连续换相失败的逆变侧交流线路故障,采用该保护方法容易造成非故障相保护误动作、导致故障进一步扩大。上述研究为高压交直流互联系统交流线路主保护的适应性分析及改进提供了思路,但研究过程缺乏系统的理论支撑,所提出的保护原理难以兼顾保护对于灵敏性与选择性的要求,在实际工程中可行性较低。

[0005] 因此,为保证高压交直流互联网交流系统故障时交流线路主保护的速动性与可靠性,分析导致故障分量电流差动保护适应性降低的主要原因,并根据分析结论提出切实可行的高压交直流互联网交流线路主保护原理,对于维护高压交直流互联网的安全稳定运行具有重要意义。

发明内容

[0006] 针对上述问题,本发明提出一种基于单相电流暂降检测的交流线路自适应故障分量电流差动保护方法。本发明考虑了高压交直流互联网故障时交直流系统之间的相互影响,计及了由直流控制系统调节作用所引入逆变侧交流系统的非线性特征,并结合故障后直流系统注入逆变侧交流系统电流的变化趋势提出了一种基于单相电流暂降检测的自适应故障分量电流差动保护方法,从而保证了高压交直流互联网逆变侧交流系统故障时故障的快速隔离与系统供电的恢复。本发明原理简单有效,能够兼顾保护的灵敏性与可靠性,可以避免因参数选择不当或线路状况改变所导致的保护整体性能下降。本发明的技术方案如下:

[0007] 一种基于电流暂降检测的自适应故障分量电流差动保护原理,其步骤如下:

[0008] (1) 设定自适应故障分量电流差动保护判据的参数,包括判据自适应调节启动整定系数 m ;判据自适应比率制动系数 k'_{res} ;各参数的设定需兼顾保护动作的可靠性与灵敏性,同时判据性能应不受系统运行方式影响。

[0009] (2) 实时采集高压交直流互联系统中由直流系统注入逆变侧交流系统的电流,通过低通滤波器消除所采集到的电流中高频分量及噪声的干扰;将滤波后的电流变换到单相虚拟 $\alpha\beta$ 坐标系,进而得到该电流在 $\alpha\beta$ 坐标系中的电流幅值 I_m ;

[0010] (3) 判断单相虚拟 $\alpha\beta$ 坐标系中的电流幅值 I_m 与保护自适应调节启动整定门槛值 $m \cdot I_{mN}$ 的关系, I_{mN} 为系统正常运行时直流系统注入逆变侧交流系统的负荷电流幅值;若 $I_m < m \cdot I_{mN}$ 则将自适应故障分量电流差动保护判据中的比率制动系数调整为 k'_{res} ;若 $I_m > m \cdot I_{mN}$ 则保持保护判据中的原有比率制动系数 k_{res} 不变;

[0011] (4) 通过全周傅式算法提取流经逆变侧交流线路两端保护的电流的工频故障分量;基于动态相量理论以及基尔霍夫电流定律对逆变侧交流系统故障分量网络进行分析,得到自适应故障分量电流差动保护判据中的差动电流故障分量幅值 ΔI_{diff} 与制动电流故障分量幅值 ΔI_{res} ;

[0012] (5) 判断差动电流故障分量幅值 ΔI_{diff} 是否高于最大不平衡电流幅值 I_{set} ;若 $\Delta I_{diff} > I_{set}$ 则进一步判断 ΔI_{diff} 与制动电流故障分量幅值 ΔI_{res} 的关系;若在 $I_m < m \cdot I_{mN}$ 时, ΔI_{diff} 与 ΔI_{res} 之间满足 $\Delta I_{diff} > k'_{res} \cdot \Delta I_{res}$,或在 $I_m \geq m \cdot I_{mN}$ 时满足 $\Delta I_{diff} > k_{res} \cdot \Delta I_{res}$,则判断高压交直流互联系统逆变侧交流线路发生区内故障,自适应故障分量电流差动保护立

即出口故障相保护动作；

[0013] 优选地， m 取值范围在(0.55,1)区间内； k'_{res} 取值范围在(0,0.5)区间内。

[0014] 本发明针对高压交直流互联电网逆变侧交流系统故障后，故障分量电流差动保护在区内故障时出现灵敏性下降甚至拒动的问题，提出了一种基于单相电流暂降检测的交流线路自适应故障分量电流差动保护原理。与现有技术相比具有以下优点：

[0015] (1) 本发明不受直流控制系统调节作用的影响，能够实现不同故障严重程度下故障的快速切除与供电的恢复。

[0016] (2) 本发明提方法不受电流过零点以及数据窗长的影响，能够降低数据采集所带来的误差与时延，所采用的方法理论成熟、效果可靠。

[0017] (3) 与现有方法相比，本发明方法能够兼顾保护动作的可靠性与灵敏性，其动作性能不受参数选取的影响，更有利于故障的快速隔离及恢复。

附图说明

[0018] 图1高压交直流互联系统模型主电路。

[0019] 图2 CIGRE HVDC标准模型控制器外特性曲线。

[0020] 图3逆变侧交流系统电路。

[0021] 图4单相电流模量— $\alpha\beta$ 变化原理框图。

[0022] 图中标号说明：

[0023] 图1中， α_N 为整流侧额定触发角； γ_N 为逆变侧额定关断角； U_{LL} 为测量的逆变侧换流变压器阀侧线电压，即换相电压； U_{dN} 、 I_{dN} 为直流输电线上额定电压、电流。

[0024] 图2中， U^*_c 为直流线路中点电压标么值； $I^*_{dc_r}$ 为直流控制系统整流侧控制器输出的电流指令值； U_H 和 U_L 分别为整流侧控制器控制策略切换触发电压上下限； I_{dH} 和 I_{dL} 分别为直流控制系统整流侧控制器输出的电流指令值的上下限。

[0025] 图3中， \dot{I}_{dc} 为由直流系统提供的、经直流系统逆变侧换流阀及变压器变换后的电流； \dot{I}_c 为逆变侧换流母线无功补偿装置提供的电流； \dot{I}'_{eqm} 和 \dot{I}_n 分别为流经逆变侧交流线路两侧保护的电流； Z_s 和 \dot{E}_s 分别为与直流系统间接相连的交流系统等值电源内阻抗与电压相量。

[0026] 图4中， i_{eqm} 为直流系统注入逆变侧交流系统的单相电流瞬时值； i_α 、 i_β 为 i_{eqm} 转换到单相虚拟 $\alpha\beta$ 坐标系后，分别在 α 坐标轴与 β 坐标轴下的瞬时值分量； I_m 为由 i_α 、 i_β 合成得到的电流实时幅值。

具体实施方式

[0027] 高压交直流互联电网逆变侧交流系统发生故障后，直流控制系统整流侧控制器的控制策略随故障严重程度的增大而切换，这将导致直流系统电流随控制策略的切换而呈现分段减小。直流控制系统整流侧控制器所输出的电流调节指令如下：

$$[0028] I_{dc_r}^* = \begin{cases} 1 & U_c^* > 0.9 \\ 0.9U_c^* + 0.19 & 0.4 \leq U_c^* \leq 0.9 \\ 0.55 & U_c^* < 0.4 \end{cases} \quad (1)$$

[0029] 式中, $I_{dc_r}^*$ 为直流控制系统整流侧控制器输出的直流系统电流指令值; U_c^* 为直流线路中点电压标幺值:

$$[0030] U_c(s) = \frac{(I_{dc_r}(s) + C u_{c(0)}) (R + s L_i) + U_{dc_i}(s) - L_i \cdot i_{dc_i(0)}}{1 + s C (R + s L_i)} \quad (2)$$

[0031] 式中, R 、 C 分别为直流线路的等值电阻及电容; L_r 、 L_i 分别为整流侧及逆变侧的线路电感与平波电抗器电感之和; $i_{dc_i(0)}$ 为故障时刻流经 L_i 的电流瞬时值; $u_{c(0)}$ 为线路电容电压初始值; $U_{dc_i}(s)$ 为直流线路逆变侧系统简化可变电压源。

[0032] 联立式 (1) - (2) 可得到流经直流线路逆变侧系统的直流电流 $I_{dc_i}(s)$:

$$[0033] I_{dc_i}(s) = \frac{U_c(s) - U_{dc_i}(s) + L_i \cdot i_{dc_i(0)}}{R + s L_i} \quad (3)$$

[0034] 由式 (3) 所得到的 $I_{dc_i}(s)$ 随直流控制系统整流侧控制器的控制策略改变而呈现分段减小的变化特征。对 $I_{dc_i}(s)$ 进行拉普拉斯反变换, 可得到流经直流线路逆变侧系统的时域形式直流电流 i_{dc_i} 。结合开关函数理论, 可得到直流系统注入逆变侧交流系统的电流 \dot{I}'_{eqm} 如下:

$$[0035] \dot{I}'_{eqm} = \langle i_{dc_i} \rangle \langle S_i \rangle \quad (4)$$

[0036] 式中, S_i 为电流开关函数。联立式 (1) - (4) 可知, 故障后直流系统注入逆变侧交流系统的电流 \dot{I}'_{eqm} 在直流控制系统的调节作用下出现非线性跌落, 该变化趋势与双端电源纯交流系统故障后电流增大的趋势有所不同, 将会造成传统故障分量电流差动保护拒动。为此提出基于直流系统注入逆变侧交流系统电流暂降检测的自适应故障分量电流差动保护判据如下:

$$[0037] \begin{cases} \Delta I_{diff} > I_{set} \\ \Delta I_{diff} > k_{res} \Delta I_{res} , I_m \geq m I_{mN} \\ \Delta I_{diff} > k'_{res} \Delta I_{res} , I_m < m I_{mN} \end{cases} \quad (5)$$

[0038] 式中, ΔI_{diff} 为差动电流故障分量幅值; I_{set} 为最大不平衡电流幅值; k_{res} 为传统判据比率制动系数; ΔI_{res} 为制动电流故障分量幅值; k'_{res} 为自适应比率制动系数; I_m 为故障后直流系统注入逆变侧交流系统的电流的实时幅值; m 为自适应调节启动整定系数; I_{mN} 为系统正常运行时直流系统注入逆变侧交流系统的负荷电流幅值。

[0039] 由于直流控制系统的调节具有快速非线性特征, 因此故障后直流系统注入逆变侧交流系统的电流的幅值将随控制系统的调节产生快速变化。为准确检测故障后直流系统注入逆变侧交流系统的电流幅值 I_m 的变化趋势, 本发明对实时采集得到的单相电流 i_{eqm} 进行求导, 再结合三角函数公式可将 i_{eqm} 转换到如下单相虚拟 $\alpha\beta$ 坐标系中:

$$[0040] \quad \begin{cases} i_\beta = i_{\text{eqm}} \\ i_u = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{d(i_\beta)}{dt} = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{d(i_{\text{eqm}})}{dt} \end{cases} \quad (6)$$

[0041] 则可得到故障后直流系统注入逆变侧交流系统的电流的实时幅值 I_m 如式 (7) 所示:

$$[0042] \quad I_m = \sqrt{i_a^2 + i_\beta^2} \quad (7)$$

[0043] 当由式 (7) 得到的故障后直流系统注入逆变侧交流系统的电流的实时幅值 I_m 能够快速、准确反映直流控制系统对电流的调节作用,能够用于式 (5) 中故障分量电流差动保护判据比率制动系数的自适应调整。下面结合附图及实施例对本发明做进一步详细说明。

[0044] 本发明的自适应故障分量电流差动保护包括以下步骤:

[0045] (1) 如图1所示,建立高压交直流互联系统的仿真分析模型,通过该模型实时采集流经逆变侧交流线路两端保护的电流瞬时值。利用全波傅里叶算法提取所采集到的电流的工频故障分量。

[0046] (2) 如图2所示,结合直流控制系统整流侧控制器对于直流系统电流的调节范围,对自适应故障分量电流差动保护的参数取值区间进行限定,进而合理设置判据自适应调节启动整定系数 m 以及判据自适应比率制动系数 k'_{res} 的具体数值。参数设定应保证保护判据不受系统运行方式的影响。

[0047] (3) 如图3所示,对流经逆变侧交流线路两端保护的电流进行实时采样。通过全波傅里叶算法提取两端电流的工频故障分量 Δi_{eqm} 与 Δi_n 。按照图3所示电流正方向,由式 (8) 可得到自适应故障分量电流差动保护判据中的差动电流故障分量 Δi_{diff} 与制动电流故障分量 Δi_{res} :

$$[0048] \quad \begin{cases} \Delta i_{\text{diff}} = \Delta i_{\text{eqm}} - \Delta i_n \\ \Delta i_{\text{res}} = \Delta i_{\text{eqm}} + \Delta i_n \end{cases} \quad (8)$$

[0049] (4) 如图4所示,将步骤 (3) 中流经线路靠近直流系统侧保护的实时电流采样值转换到虚拟单相 $\alpha\beta$ 坐标系中,检测该电流在 $\alpha\beta$ 坐标系下的电流幅值 I_m 与故障分量电流差动保护自适应调整门槛值 $m \cdot I_{mN}$ 之间的大小关系。若 $I_m < m \cdot I_{mN}$, 则证明由直流系统注入逆变侧交流系统的电流已经在直流控制系统的调节下发生跌落,此时可将故障分量电流差动保护判据中的比率制动系数调整为自适应比率制动系数 k'_{res} ; 若 $I_m \geq m \cdot I_{mN}$, 则保持原有比率制动系数 k_{res} 不变。

[0050] 判断自适应故障分量电流差动保护判据中差动电流故障分量幅值 ΔI_{diff} 是否高于最大不平衡电流幅值 I_{set} 。若 $\Delta I_{\text{diff}} > I_{\text{set}}$ 则进一步判断 ΔI_{diff} 与制动电流故障分量幅值 ΔI_{res} 的关系。若在 $I_m < m \cdot I_{mN}$ 时, ΔI_{diff} 与 ΔI_{res} 之间满足 $\Delta I_{\text{diff}} > k'_{\text{res}} \cdot \Delta I_{\text{res}}$, 或在 $I_m \geq m \cdot I_{mN}$ 时满足 $\Delta I_{\text{diff}} > k_{\text{res}} \cdot \Delta I_{\text{res}}$, 则证明高压交直流互联系统逆变侧交流线路发生区内故障,自适应故障分量电流差动保护立即出口保护动作。

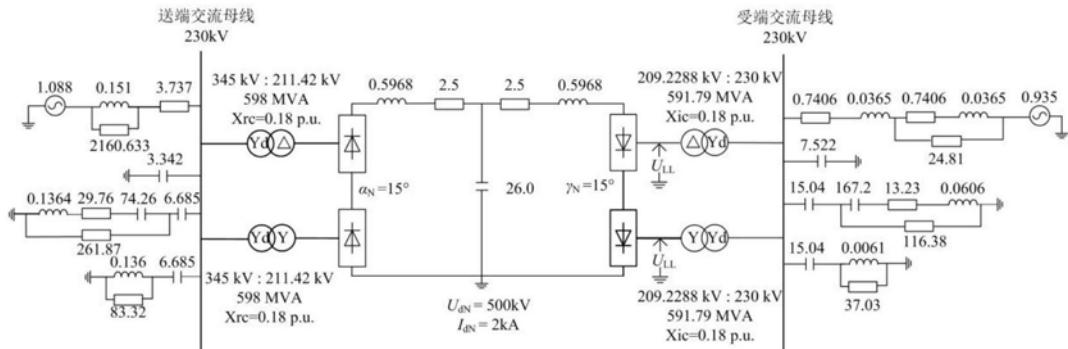


图1

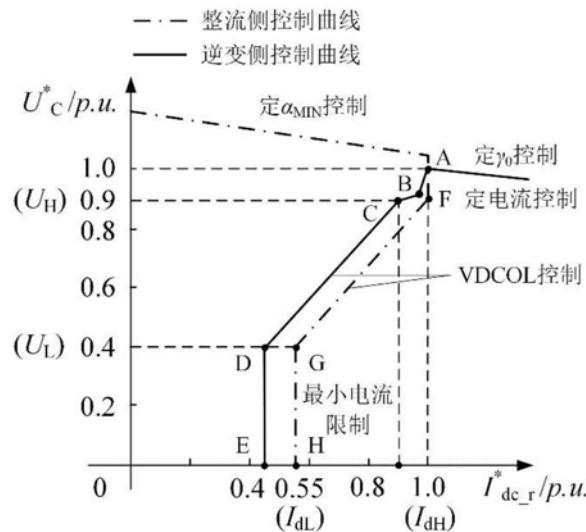


图2

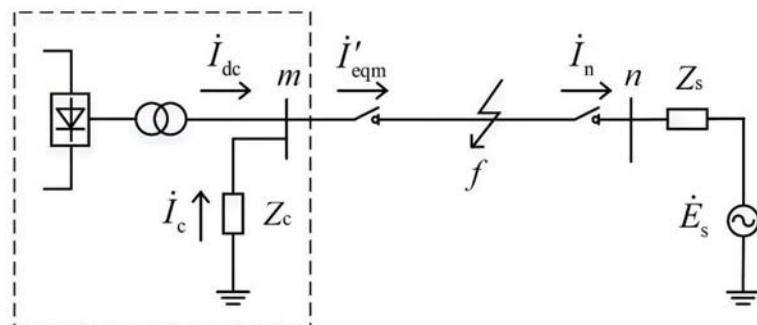


图3

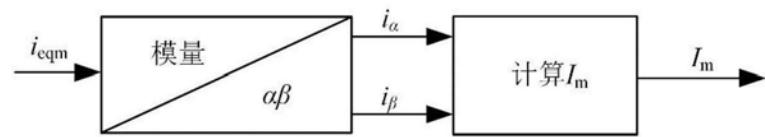


图4