

含超导限流器的电力系统故障通用计算方法

曹国臣 哈尔滨工业大学 (150001)

邹春解 东北电力学院 (132012)

【摘要】 本文将含超导限流器的电力系统中的各种故障(各种简单故障和任意复杂故障)统一处理成对原网对称修正与不对称修正的组合,将含超导限流器的故障电力系统分解成两大部分:第一部分是变结构无故障对称网络部分;第二部分是模拟故障并计及超导限流器限流作用的不对称网络部分,在此基础上,基于补偿法和相序参数变换技术,提出了一种快速计算含超导限流器的电力系统中各种故障的通用方法。这种方法不但将含超导限流器的电力系统中各种故障的计算方法统一起来,而且对故障类型没有限制,还可适应因故障和超导限流器的限流作用而造成的电力系统网络拓扑结构的变化。

【关键词】 超导限流器 电力系统 故障计算 补偿法 相序参数变换技术

0 引言

故障计算是电力系统设计、事故分析、继电保证整定计算及其动作行为分析中所需的一项基本计算。随着电力系统的发展,装机容量越来越大,网络结构日益复杂,短路电流水平越来越高。为将短路电流限制到现有断路器的开断电流以下,已研制出各种限流器(Fault Current Limiter)^[1-4],其中由超导材料构成的限流器,称为超导限流器(Superconducting Fault Current Limiter)。超导限流器利用超导体所固有的 S/N (super Conductivity/Normal Conductivity)转换现象来限制电力系统的短路电流水平。所谓 S/N 转换现象是指当通过超导限流器的电流超过超导体本身固有的临界电流时,超导体就从零阻抗的超导态瞬间(小于1ms)跃变为高阻抗的常导状态,即相当于在故障线路中插入一个高阻抗,从而达到限制短路电流的目的。由于不对称故障时仅故障相的超导限流器发生 S/N 转换,结果造成故障线路参数不对称,给含超导限流器的电力系统故障计算带来困难。文献^[5]提出采用常规处理复杂故障的方法(完全基于对称分量法和多

口网络理论)来计算含超导限流器的电力系统中的各种简单故障。这种计算方法与常规复杂故障计算方法存在着同样的问题:(1)不但序网连接复杂,而且复合序网通用性差,即故障类型不同序网连接方式也随之改变;(2)只能计算由简单的纵向和横向故障组合而成的一般性复杂故障,对那些继电保护工程师感兴趣的任意复杂故障毫无处理能力。目前,电力系统故障计算方法的研究在力求提高故障计算速度和计算效率的同时,正向通用化、规范化的方向发展^[6-8]。因此,研究含超导限流器的电力系统中各种故障的通用计算方法,不但具有理论意义,且有实用价值。

本文将含超导限流器的电力系统中的各种故障统一处理成对原网的对称修正与不对称修正的组合,将故障后的电力系统分解成变结构无故障对称网络与故障不对称网络两大部分,借助于补偿法在序坐标下对变结构无故障对称网络进行多端口戴维南等值化简,并利用相序参数变换技术形成故障不对称网络在序坐标下的节点导纳阵,再应用补偿法将故障不对称网络的影响等效成向变结构无故障对称网络注入的序补偿电流,推导出了一种不需修改原网数学模型快速计算含超导限流器的电力系统中各种故障的通用方法。

1 计算原理

1.1 故障时超导限流器的模拟

超导限流器的电流—阻抗特性如图 1 所示。当通过超导限流器的电流小于超导体固有的临界电流时, 超导限流器工作在超导状态, 呈现出零阻抗; 当通过超导限流器的电流大于超导体的临界电流时, 超导限流器由超导态立即转变为常导态, 呈现出高阻抗 Z_{fc1} 。因此, 超导限流器的限流作用可用在故障相超导限流器安装处插入阻抗 Z_{fc1} 来模拟, 见图 2。图中, 超导限流器安装在线路 $i-j$ 的 i 节点侧, 故障类型为 d 点 b 相接地短路加 f 点 a 相断线。

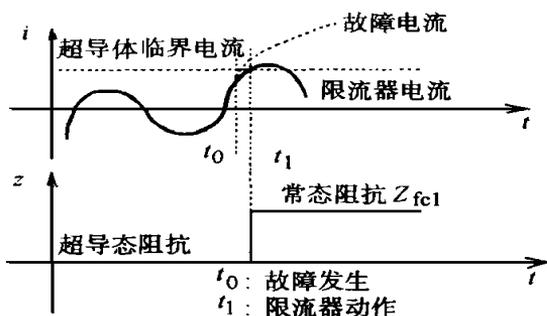
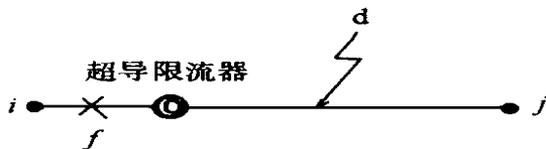
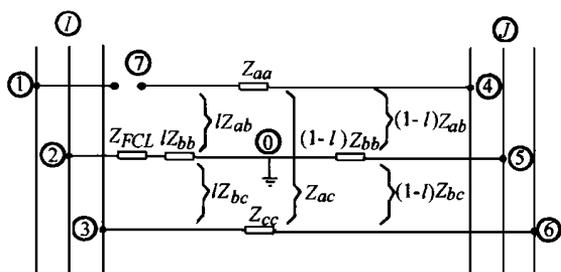


图 1 超导限流器的电流—阻抗特性



(a) 超导限流器安装位置及故障类型示意图



(b) Z_{FCL} 的插入方法

图 2 故障时超导限流器的模拟

1.2 各种故障的模拟

含有超导限流器的线路故障时, 因故障和超导限流器的限流作用将造成电力系统网络拓

扑结构局部发生不对称变化。为确保在计算中不修改原网数学模型, 将故障分解成对原网对称修正与不对称修正的组合, 即: 首先向原网接入相应的等值支路组 Z_{c012} , 将故障所涉及线路(故障线路及与其有零序互感的线路) 从原网中切除, 然后再接入描述计及超导限流器作用和故障的不对称网络 ΔY_{b012} , 见图 3。

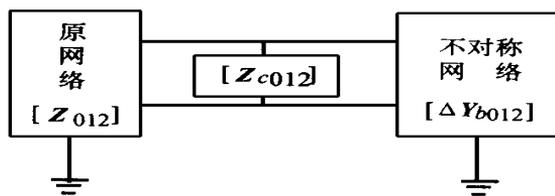


图 3 故障的模拟

1.3 故障的计算原理

设含超导限流器的电力系统中发生任意类型的故障, 故障所涉及到的线路与系统其它部分相关联的节点集为 $b = \{b_1, \dots, b_k, \dots, b_s\}$ 。以节点 b 为边界节点, 采用图 2 和图 3 的方法来模拟故障时超导限流器的作用和故障, 便得到计算含超导限流器的电力系统故障的统一模型, 见图 4。图中: 边界左侧为变结构无故障对称网络, 边界右侧为描述故障和计及超导限流器作用的不对称网络; I_{g012} 为描述系统内发电机的等值电流源。

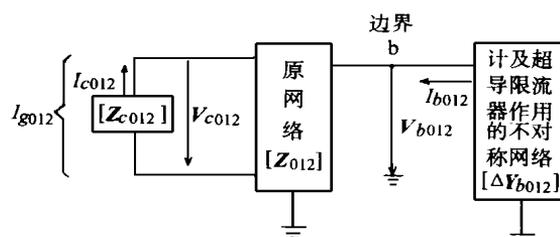


图 4 故障计算的统一模型

根据叠加原理, 故障时图 4 边界左侧变结构对称网络的节点电压应等于发电机节点注入电流 I_{g012} 产生的节点电压与故障边界节点注入电流 I_{b012} 产生的节点电压之和。对具体的电力系统来讲, 发电机节点注入电流 I_{g012} 已给定, 因此, 含超导限流器的电力系统故障计算的关键在于故障边界节点注入电流 I_{b012} 的计算。

2 故障边界节点注入电流 I_{b012} 的计算

在图4中,利用多端口戴维南定理将边界左侧变结构对称网络化简,即得到计算故障边界电流的等值电路,见图5。

如果图5中的电路参数 Y_{b012} 、 Z_{b012} 和 $V_{b012[0]}$ 已知,根据电路的基本定律很容易求得故障边界电流 I_{b012} ,由图5可得:

$$I_{b012} = - Y_{b012} V_{b012}$$

$$V_{b012} = V_{b012[0]} + Z_{b012} I_{b012}$$

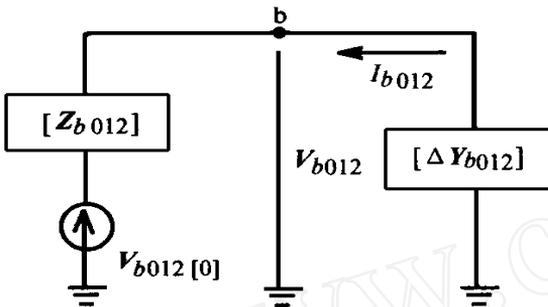


图5 计算故障边界电流的等值电路

将上面两式联立,可解得故障边界电流:

$$I_{b012} = - [U + Y_{b012} Z_{b012}]^{-1} Y_{b012} V_{b012[0]} \quad (1)$$

式中 U 为单位矩阵;

$$Z_{b012} = \begin{bmatrix} Z_{b0} & & \\ & Z_{b1} & \\ & & Z_{b2} \end{bmatrix} \text{ 为变结构对称}$$

网络的边界节点等值序阻抗阵;

$$V_{b012[0]} = \begin{bmatrix} V_{b0[0]} \\ V_{b1[0]} \\ V_{b2[0]} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_{b1[0]} \\ 0 \end{bmatrix} \text{ 为变结构}$$

对称网络的边界节点序开路电压矩阵。

图5中的电路参数 Y_{b012} 、 Z_{b012} 和 $V_{b012[0]}$,可按如下方法求得。

(1) 不对称网络边界节点导纳阵 Y_{b012} 的形成

因图5中边界右侧的网络不对称,不能直接在序坐标下形成 Y_{b012} ,只能先在相坐标下形成不对称网络的支路相阻抗阵,从而求出边界节点相导纳阵,然后通过相序参数变换求得

Y_{b012} 。形成 Y_{b012} 的具体步骤如下:

a、根据故障类型,作出描述故障和超导限流器限流作用的不对称网络;

b、根据故障时的不对称网络,写出相应的支路相阻抗阵 $Z_{b, abc}$;

c、根据网络理论,由支路相阻抗 $Z_{b, abc}$ 求出节点相导纳阵 $Y_{b, abc}$, 即:

$$Y_{b, abc} = A [Z_{b, abc}]^{-1} A^T$$

式中 A 为不对称网络节点与支路的关联矩阵;

d、消去节点相导纳阵 $Y_{b, abc}$ 中除故障边界节点以外的内部节点,求出 $Y_{b, abc}$;

e、对 $Y_{b, abc}$ 进行相序参数变换,便得到 Y_{b012} , 即:

$$Y_{b, 012} = T^{-1} Y_{b, abc} T \quad (2)$$

式中 变换矩阵 $T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{-j\frac{2}{3}} & e^{j\frac{2}{3}} \\ 1 & e^{j\frac{2}{3}} & e^{-j\frac{2}{3}} \end{bmatrix}$

应注意的是,不论含超导限流器的电力系统中发生任何类型的故障,按上面所介绍的方法,总可以形成模拟故障和超导限流器限流作用的 Y_{b012} ,因此,文中算法在计算原理上对故障类型没有任何限制。

(2) 变结构对称网络边界节点等值参数 Z_{b012} 、 $V_{b012[0]}$ 的计算

为保证在计算 Z_{b012} 和 $V_{b012[0]}$ 时不修改原网数学模型,根据补偿法,由图4可见,应利用等值支路组中的电流 I_{c012} 来模拟 Z_{c012} 的影响。

a、 Z_{br} ($r = 0, 1, 2$) 的计算

设边界节点为 b_k ($k = 作用, \dots, s$)、边界左侧对称网络中拓扑结构变化涉及到的支路为 $p_m - q_m$ ($m = 1, 2, \dots, t$)。根据端口阻抗参数的物理意义,可作出计算 Z_{br} 的等值电路,见图6。图中: Z_{cr} 为模切除故障所涉及到的线路所造成的网络拓扑结构对称变化而接入的 r 序等值支路组。

(a) 端口自阻抗的计算

根据端口自阻抗参数的物理意义和叠加原理:

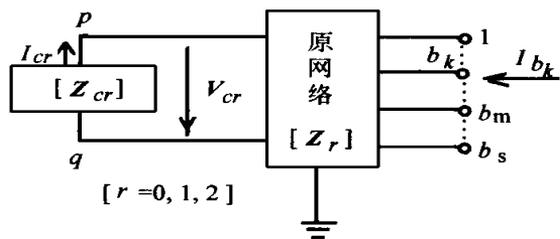


图6 计算 Z_{br} 的等值电路

$$Z_{b_k b_k^{(r)}} = V_{(b_k)}^{(b_k)} = V_{b_k^{(r)}}^{(b_k)} + V_{b_k^{(r)}} I_{cr} \quad (k = 1, 2, \dots, s; r = 0, 1, 2) \quad (3)$$

式中 $V_{b_k^{(r)}} = [V_{b_k^{(r)}}^{(p_1 q_1)}, \dots, V_{b_k^{(r)}}^{(p_1 q_1)}]$

补偿电流 I_{cr} 可利用欧姆定理和叠加原理由图6求得:

$$I_{cr} = - [A_{cr}^T Z_r A_{cr} + Z_{cr}] A_{cr}^T Z_r I_{b_k^{(r)}} \quad (r = 0, 1, 2) \quad (4)$$

式中 A_{cr} 为 r 序网原网节点与 Z_{cr} 的关联矩阵;

Z_r 为 r 序网原网节点阻抗阵;

b_k

$I_{b_k^{(r)}} = [0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0]^T$ 为 r 序网边界节点的注入电流。

(b) 端口互阻抗的计算

根据互阻抗参数的物理意义和叠加原理:

$$Z_{b_k b_m^{(r)}} = V_{(b_k)}^{(b_k)} = V_{b_m^{(r)}}^{(b_k)} + V_{b_m^{(r)}} I_{cr} \quad (K = 1, 2, \dots, s; m = 1, 2, \dots, s; K = m; r = 0, 1, 2) \quad (5)$$

式中 $V_{b_m^{(r)}} = [V_{b_m^{(r)}}^{(p_1 q_1)}, \dots, V_{b_m^{(r)}}^{(p_1 q_1)}]$

在上面和下面的公式中,未加说明的符号符合如下规定:

$V_{m^{(i)}}^{(i)}$ 为在 r 序原网任意节点 i 加入正单位电流时,任意节点 m 的电压,即 $V_{m^{(i)}}^{(i)}$ 等于 r 序原网节点阻抗阵中第 i 行第 m 列元素;

$$V_{m^{(i)}}^{(ij)} = V_{m^{(i)}}^{(i)} - V_{m^{(j)}}^{(i)};$$

$$V_{pq^{(r)}}^{(ij)} = V_p^{(ij)} - V_q^{(ij)};$$

$Z_{ij-i_j^{(r)}}$ 为任意支路 $i-j$ 的 r 序支路阻抗 b 、 $V_{b_l/0_j}$ 的计算

设系统中 G_1, G_2, \dots, G_s 号母线为发电机母线。根据端口开路电压的物理意义,可作出计

算 $V_{b_l/0_j}$ 的等值电路,见图7。图中: E_m, Z_m 为第 m 台发电机的等值电势和内阻抗。

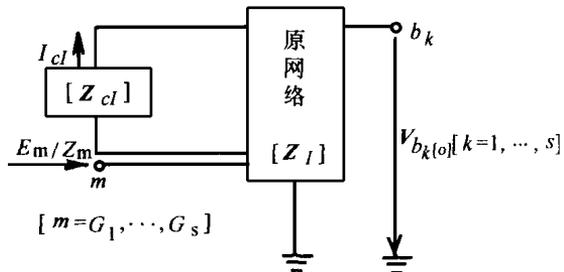


图7 计算 $V_{b_l/0_j}$ 的等值电路

根据叠加原理,由图7,任意边界节点 b_k 的开路电压为:

$$V_{b_k/0_j} = \sum_{m=G_1}^{G_s} V_{b_k^{(1)}}^{(m)} \frac{E_m}{Z_m} \quad (k = 1, 2, \dots, s) \quad (6)$$

$$\text{式中 } V_{b_k^{(1)}}^{(m)} = V_{m^{(1)}}^{(b_k)} = V_{m^{(1)}}^{(b_k)} + V_{m^{(1)}} I_{c1} \quad (7)$$

其中 $V_{m^{(1)}} = [V_{m^{(1)}}^{(p_1 q_1)}, \dots, V_{m^{(1)}}^{(p_1 q_1)}]$; I_{c1} 可由式(4)求得。

3 任意节点电压的计算

求出故障边界节点注入电流 $I_{b_0/12}$ 以后,根据线性网络的特点和叠加原理,由图4可求得变结构对称网络的任意节点电压为:

$$V_{t^{(r)}} = \sum_{k} V_{t^{(r)}}^{(b_k)} I_{b_k^{(r)}} \quad (r = 0, 1, 2) \quad (8)$$

式中 $V_{t^{(r)}}^{(b_k)} = V_{t^{(r)}}^{(b_k)} + V_{t^{(r)}} I_{cr}$

其中 $V_{t^{(r)}} = [V_{t^{(r)}}^{(p_1 q_1)}, \dots, V_{t^{(r)}}^{(p_1 q_1)}]$; I_{cr} 可由式(4)求得。

对正序网来讲,由式(8)求出的仅为正序电压的故障分量 $V_{t^{(1)}}$,实际电压应为故障前变结构对称网络中 t 节点电压 $V_{t/0_j}$ 与 $V_{t^{(1)}}$ 之和,即:

$$V_{t^{(1)}} = V_{t/0_j} + V_{t^{(1)}} \quad (9)$$

故障前变结构对称网络中 t 节点电压 $V_{t/0_j}$,可根据叠加原理由图7求得:

$$V_{t/0_j} = \sum_{m=G_1}^{G_s} V_{t^{(1)}}^{(m)} \frac{E_m}{Z_m} \quad (10)$$

capitive potential Devices. Electric Energy conference , 1989

4 陈德树. 计算机继电保护原理与技术. 水利电力出版社, 1992

DIGITAL SIMULATION RESEARCH ON TRANSIENT RESPONSE OF CVT

Yu Weiyong, Wu Xiaojian (Shanghai Traffic University, 200240, China)

Abstract The transient characteristics of CVT is digitally simulated in this paper. Different factors related to the transient characteristic of CVT are analyzed and the influence of CVT transient response process on the microprocessor - based protection basing on the full - wave Fourier algorithm is researched. Meanwhile, the influence of the series - compensation capacitors put on UHV transmission line to the transient response of CVT is analyzed and researched.

Keywords CVT transient response full - wave fourier algorithm series - compensation capacitor

(上接 26 页)

A UNIFIED METHOD FOR CALCULATING FAULTS IN POWER SYSTEM WITH SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITERS

Cao Guochen (Harbin Institute of Technology, 15001, China)

Zou Chunjie (Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 132012, China)

Abstract In this paper, any type of faults (simple or complex) in power system with Superconducting Fault Current Limiters (SFCL) are modeled as symmetrical or asymmetrical modifications to each original sequence networks. Based on the compensation method, by using the phase - sequence parameter transformation technique and the multi - dimensional Thevenin theorem, a unified method is presented for fast calculation of any fault in power system with SFCL. This method can be adaptable to the network changes in topology caused by faults and SFCL. The method has been proved to be fast and accurate by a numerical example.

Keywords Surperconducting fault current limiters power system fault calculation compensation method phase - sequence parameter transformation technique

(上接 21 页)

时刻的捕捉方法。

(4) 仿真计算表明按最佳重合时机重合可以在相同的潮流方式下极大地提高暂态稳定裕度, 在最后一次操作后相同的功角摇摆程度下大幅度提高网络传输能力和暂稳极限。

参考文献

1 张保会、袁越、薄志谦. 最佳重合时间及其整定

计算. 中国电力, No. 2, 1995

2 张保会、康小宁、薄志谦. 发电厂送出线重合闸时机的优选与捕捉. 中国电机工程学报, No. 3, 1995

3 王梅义等. 超高压电网继电保护运行技术. 水电出版社, 1984

4 谢宝炎等. 全国电网稳定会议选集. 电网技术, No. 3 ~ No. 4, 1983

5 葛耀中. 单相重合闸过程中瞬时性与永久性故障的差别. 西安交通大学学报, No. 2, 1984

OPTIMIZING THE RECLOSING TIME TO IMPROVE THE TRANSMISSION CAPACITY OF POWER NETWORK

Zhang Baohui, Lei Min, Yuan Yuchun (Xian Traffic University, 710049, Xian, China)

Abstract The influence of reclosing time on power system stability is discussed in this paper, the mathematical model is also established for analysis of the influence. Transient energy function is applied to determine the optimal reclosing time. The method in this paper set up a theoretical foundation for analysis of the optimal reclosing time.

Keywords stability reclose optimal time