

支路短路电流直流分量及衰减时间常数计算方法

曹 炜¹, 张 正¹, 陈春阳², 张 捷¹

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网河南省电力公司信阳供电公司, 河南 信阳 464000)

摘 要:随着电力系统电压等级的提高, 直流分量对断路器开断能力的影响被密切关注, 但针对断路器支路短路电流直流分量计算方法的研究却非常少。基于此, 提出一种基于转移阻抗实现支路短路电流直流分量及其衰减时间常数计算的方法。利用支路追加法形成节点阻抗矩阵的原理, 在已知原网络节点阻抗矩阵的条件下, 根据系统短路时网络的特点, 使变换后的网络能够方便地进行各断路器支路短路电流直流分量及其衰减时间常数的计算, 并归纳出计及网络拓扑结构变化时修正节点阻抗矩阵的统一算法, 该算法具有计算速度快、物理概念清晰以及易于编程实现扫描计算等特点。EMTP 仿真验证该文方法的准确性, 并与 PSS/E 计算支路短路电流直流分量的计算结果进行比较, 验证本文方法的优越性。

关 键 词:支路追加法; 短路电流; 直流分量; 衰减时间常数; 转移阻抗

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.02.004

中图分类号: TM713

文章编号: 1673-9140(2021)02-0031-09

Study on calculation methods for DC component and decay time constant of branch short circuit current

CAO Wei¹, ZHANG Zheng¹, CHEN Chunyang², ZHANG Jie¹

(1. Electric Power Engineering of Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Xinyang Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Co., Ltd., Xinyang 464000, China)

Abstract: As the voltage level of the power system increases, the DC component influence on the breaking capacity of the circuit breaker has been closely concerned. However, there are few studies on the calculation method of DC component of short circuit current in the circuit breaker branch. In this paper, a calculation method is proposed for the DC component of branch short-circuit current and its decay time constant based on transfer impedance. Firstly, in the case of knowing the impedance matrix of the original network and considering the characteristics of the network when the system is short-circuited, the network is transformed based on the principle of forming the node impedance matrix using the branch-adding method. Then, the transformed network can easily calculate the DC component of the short-circuit current and the decay time constant of each branch. In addition, a unified algorithm for forming the node impedance matrix is concluded when considering the changes of the network topology. It has the advantages of fast calculation speed, clear physical concept, and it is easy to program so as to achieve scanning calculations. The accuracy of the proposed method is verified by EMTP simulation. Compared with results from PSS/E, the superiority of the

收稿日期: 2018-08-01; 修回日期: 2018-10-18

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(51807114)

通信作者: 曹 炜(1963-), 女, 博士, 教授, 主要从事电力系统分析与控制等研究; E-mail: cw-jenny@163.com

proposed method is also verified.

Key words: branch-adding method; short-circuit current; DC component; decay time constant; transfer impedance; input impedance

近年来,随着特高压工程的发展,为了降低输电损耗,发电机、变压器容量逐步增大,输电线路电阻进一步减小,导致短路点等效系统的电抗电阻比 X/R 越来越大,使短路电流直流分量衰减速度越来越慢,对断路器实际开断能力的影响也越来越明显^[1-10]。由于上述问题日渐严重,近期针对短路电流直流分量对断路器开断能力的影响成为研究热点。文献[1-4]中皆对电网中短路电流交流分量达到开关遮断电流 90% 的节点的断路器进行了直流分量校核,以评估断路器实际开断能力,但文献[1-4]用总的直流分量及其衰减时间常数作为校核依据,并不能准确地评估直流分量对断路器实际开断能力的影响。因断路器均装设在短路点所连接的各条支路上,故只计算短路点总的直流分量并不能真实反映通过断路器的短路电流真实水平。因此,只有准确计算出与短路节点相连的各断路器支路上随时间衰减的短路电流直流分量,才可以为断路器开断能力的校核提供有效依据。

现有的短路电流直流分量计算方法有等效频率法^[11]、极限频率法^[12]以及专家学者提出考虑实际电网结构求取短路点总的直流分量及其衰减时间常数的方法^[13]。在实用计算中,上述方法仅局限于求取短路点总的直流分量,而不能计算出与短路点相连的各断路器支路的直流分量及其衰减时间常数。因此,文献[11-13]中方法求取的直流分量均不能为断路器开断能力的校核提供有效直接依据。

国内机电暂态仿真软件 BPA、PSASP 等均无法计算支路短路电流直流分量,国外机电暂态仿真软件 PSS/E 虽能直接计算支路短路电流直流分量^[14-15],但其计算方法不明,经推测该方法是基于输入阻抗而计算支路短路电流直流分量,误差波动较大。电磁暂态仿真软件(如 EMTP)虽然能准确地计算支路短路电流直流分量及其衰减时间常数,但其建模工作量巨大,且后期需要对短路全电流进行分离,不利于大规模复杂网络的工程计算,也不适用于电网企业的日常例行计算。

该文提出一种基于转移阻抗的支路短路电流直

流分量计算方法,结合短路电流直流分量产生的原理,建立一种适用于求故障点所连接支路上流过的短路电流直流分量的数学模型,并将该方法通过编程实现扫描计算,直接读取以 BPA 数据格式存储的电网数据,省去复杂的建模过程,更方便地运用于工程实际。该文以 IEEE 39 系统为例,将该文方法的计算结果与 EMTP 仿真结果进行比较,验证该文方法的准确性,并与 PPS/E 计算结果对比,验证该文方法的优越性。

1 支路短路电流直流分量计算的原理

如图 1(a)所示,在有源网络 N 中有 3 条支路,分别为 i 、 j 、 k ,其阻抗分别为 z_i 、 z_j 和 z_k 。当网络在母线 f 发生三相短路时,现有方法均无法直接计算流过各支路的短路电流直流分量。以求取流过支路 i 的短路电流直流分量为例,该文将原网络变换成如图 1(b)所示的网络,在短路瞬间,可以将母线 f 所链接的 3 条支路按步骤进行网络变换:①将短路点所连接的支路分成待求支路 i 和非待求支路 j 、 k ;②将非待求支路 j 、 k 转换为接地支路的形式;③让待求支路 i 在短路点短路。通过网络变换,将短路情况由短路点三相短路变换成待求支路 i 在短路点三相短路。因短路时刻母线 f 为零电位点,故网络依然等效。3 条支路将分成发生短路的支路 i 和接地支路 j 和 k ,如此可以看作支路 i 在节点 f 上单独发生三相短路,继而可以求出该支路上的衰减时间常数 T_a 。在进行网络变换时,原网络的拓扑结构也发生了变化,因此,相应的节点阻抗矩阵需进行相应变化。

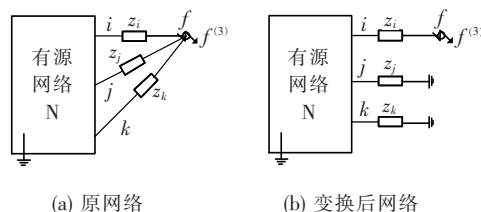


图 1 网络等效变换示意

Figure 1 Network equivalent transformation diagram

2 支路短路电流直流分量及衰减时间常数计算模型

2.1 支路衰减时间常数计算方法

该文采用基于转移阻抗的方法计算支路短路电流直流分量及衰减时间常数 T_a 。多电源、多支路的复杂线性系统网络如图 2 所示,其中, \dot{E}_n 为第 n 条电源支路的电势, z_n 为电势源 n 内阻抗。

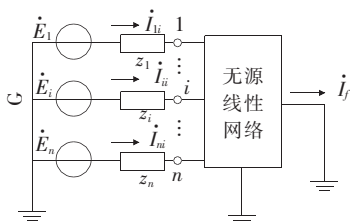


图 2 多源线性网络

Figure 2 Multi-source linear network

将网络近似简化为以短路点为中心的辐射形网络,求出各电源支路直流分量,求和得到总的直流分量,并结合电力网络数据模型特点,采用转移阻抗计算各发电机所提供直流分量以及其衰减时间常数,最后,对所有分支直流分量进行求和计算,得到故障点的直流分量。

根据叠加原理可以把故障点处总的直流分量表示为

$$i_{dc\Sigma} = \sum_{n \in G} i_{dcn} \quad (1)$$

通过网络变换将短路情况从故障点三相短路转换成某故障支路发生三相短路的情况,再运用转移阻抗法即可求得该故障支路上的直流分量以及衰减时间常数。

根据楞次定理,短路发生前、后通过电感支路的电流不能突变,直流分量的初值 i_{dc0} 由短路发生前、后瞬间的电流差值决定:

$$i_{dc0} = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi_0) - I_{pm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \quad (2)$$

式中 α 为电源初始相角; I_m 、 I_{pm} 为短路前、后的电流幅值; φ_0 、 φ 分别为短路前、后支路的阻抗角。由式(2)可知,直流分量初始值 i_{dc0} 与短路时刻有关,在进行短路电流整定计算时,通常取 i_{dc0} 的最大

值,且通常情况下可以忽略短路前正常电流的影响,直接根据短路后周期分量的初始值 I''_k 来确定直流分量初始值:

$$i_{dc0} = \sqrt{2} I''_k \quad (3)$$

根据复杂网络的化简可以将各条电源支路的转移阻抗表示为 $z_{fn} = R_{fn} + j\omega L_{fn}$, \dot{E}_n 为第 n 条电源支路的电势,则第 n 条电源支路的短路后瞬间直流分量初始值为

$$i_{dcn0} = \sqrt{2} I''_{kn} = \sqrt{2} \left| \frac{\dot{E}_n}{R_{fn} + j\omega L_{fn}} \right| \quad (4)$$

而该电源支路衰减时间常数为

$$T_{fn} = \frac{L_{fn}}{\omega R_{fn}} \quad (5)$$

则第 n 条电源支路所提供的直流分量为

$$i_{dcn}(t) = i_{dcn0} e^{-t/T_{fn}} \quad (6)$$

总的直流分量为

$$i_{dc\Sigma}(t) = \sum_{n \in G} i_{dcn0} e^{-t/T_{fn}} \quad (7)$$

式中 $i_{dc\Sigma}$ 为各支路直流分量初值 i_{dcn0} 的代数和。根据式(7)可推导出短路电流直流分量衰减时间常数:

$$T_a = \frac{-t}{\ln \left(\sum_{n \in G} \frac{i_{dcn0}}{i_{dc\Sigma}} e^{-t/T_{fn}} \right)} \quad (8)$$

其中, i_{dcn0} 可由式(4)代入每条电源支路得出。

综上,通过该文方法即可求得与故障点相连的某条故障支路的短路电流直流分量的衰减时间常数 T_a 。转移阻抗:

$$z_{fn} = \frac{Z_{ff}}{Z_{fn}} z_n \quad (9)$$

式中 z_n 为电源内阻抗; Z_{ff} 、 Z_{fn} 均为节点阻抗矩阵元素, Z_{ff} 为短路点 f 对应的自阻抗, Z_{fn} 为电源点 n 与短路点 f 之间的互阻抗。

2.2 支路网络电路模型

在短路电流计算中,节点阻抗矩阵的求取是关键。节点阻抗矩阵的形成方法主要有导纳矩阵求逆法和支路追加法 2 种。此外,也有专家学者提出了一种基于矩阵变换的节点阻抗矩阵形成新方法^[16],该方法首先形成支路电流对节点的注入电流矩阵和节点电压对支路电流矩阵,再借用稀疏矩阵求逆的前推回推算法形成整个节点阻抗矩阵^[17]。在该文

支路短路电流直流分量计算中,由于支路短路电流直流分量的计算特点需多次改变网络结构,而导纳矩阵求逆法与文献[16]的方法均无法在网络结构改变时对初始节点阻抗矩阵进行修正,只能反复生成整个阻抗矩阵,计算量大,无法满足工程实际计算需求。支路追加法在网络结构变化后,可以通过修改原有阻抗矩阵得到新的阻抗矩阵。为了实现快速计算并使该文方法更适用于工程实际^[18],当网络拓扑结构变化时,该文选择在已有节点阻抗矩阵的基础上,运用支路追加法将发生变化支路的等值阻抗作为连支进行支路追加,从而形成网络变化后的修正节点阻抗矩阵。

2.2.1 基于支路追加法的网络变换方法

如图3(a)所示,在支路 j 上追加一条阻抗为 $-z_j$ 的连支将网络拆开。由于不增加新节点,故阻抗矩阵的阶次不变。若原有各节点的注入电流保持不变,连支 $-z_j$ 的接入将改变网络中的电压分布状况。因此,对原有矩阵的各元素都要作相应修改。

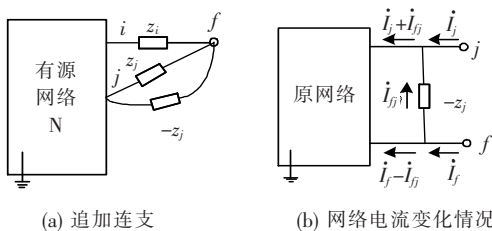


图3 追加连支示意

Figure 3 Diagram of adding chain branch

若保持各节点注入电流不变,则将网络看成图3(b)的形式,即在原网络的节点 j 和 f 之间追加一条阻抗为 $-z_j$ 的连支,连支 $-z_j$ 的接入对网络原有部分的影响:把节点 f 和 j 的注入电流分别从 \dot{I}_f 和 \dot{I}_j 改变为 $\dot{I}_j + \dot{I}_{jj}$ 和 $\dot{I}_f - \dot{I}_{jj}$ 。这时网络中任意一点 i 的电压可以利用原有的阻抗矩阵元素写出:

$$\dot{V}_i = \sum_{m=1}^n Z_{im} \dot{I}_m - (Z_{if} - Z_{ij}) \dot{I}_{jj} \quad (10)$$

式中 \dot{V}_i 为节点 i 的节点电压; Z_{im} 为节点 i 和系统中任意节点 m 之间的互阻抗; \dot{I}_m 为节点 m 的注入电流; Z_{if} 、 Z_{ij} 为节点 i 与 f 、 j 的互阻抗; \dot{I}_{jj} 为追加连支上的电流。式(10)对任何节点都成立,将它用于节点 f 、 j 可得:

$$\dot{V}_f = \sum_{m=1}^n Z_{fm} \dot{I}_m - (Z_{ff} - Z_{fj}) \dot{I}_{jj} \quad (11)$$

$$\dot{V}_j = \sum_{m=1}^n Z_{jm} \dot{I}_m - (Z_{jf} - Z_{jj}) \dot{I}_{jj} \quad (12)$$

式(11)、(12)中 \dot{V}_f 、 \dot{V}_j 分别为节点 f 、 j 的节点电压; Z_{fm} 、 Z_{jm} 分别为节点 f 、 j 与节点 m 之间的互阻抗; Z_{ff} 、 Z_{jj} 分别为节点 f 、 j 的自阻抗; Z_{jf} 为节点 f 、 j 之间的互阻抗。

阻抗为 $-z_j$ 连支的电压方程为

$$\dot{V}_f - \dot{V}_j = -z_j \dot{I}_{jj} \quad (13)$$

式中 $-z_j$ 为追加连支的阻抗值。

将式(11)、(12)代入式(13)可以解出:

$$\dot{I}_{jj} = \frac{\sum_{m=1}^n (Z_{fm} - Z_{jm}) \dot{I}_m}{Z_{ff} - 2Z_{jf} + Z_{jj} - z_j} \quad (14)$$

将式(14)带入式(10)得:

$$\dot{V}_i = \sum_{m=1}^n \left[Z_{im} - \frac{(Z_{if} - Z_{ij})(Z_{fm} - Z_{jm})}{Z_{ff} + Z_{jj} - 2Z_{jf} - z_j} \right] \dot{I}_m = \sum_{m=1}^n Z'_{im} \dot{I}_m \quad (15)$$

式中 Z'_{im} 为修正后节点阻抗矩阵中的节点 i 、 m 的互阻抗。于是有

$$Z'_{im} = Z_{im} - \frac{(Z_{if} - Z_{ij})(Z_{fm} - Z_{jm})}{Z_{ff} + Z_{jj} - 2Z_{jf} - z_j} \quad (16)$$

式(16)即为通过追加连支的方式进行网络拆分后修正阻抗矩阵元素的计算公式,其中 Z_{im} 为连支接入前的原节点阻抗矩阵元素。当完成原网络的拆分后,还需将节点 j 所连接支路变为接地支路。

2.2.2 追加对地连支的方法

在节点 j 处需追加一条阻抗为 z_j 的对地连支,如图4所示,因为是追加对地连支,所以追加后网络总节点数不发生变化。若保持各点注入电流不变,则连支 z_j 接入后,对原有网络部分的影响是将节点 j 注入电流从 \dot{I}_j 改变为 $\dot{I}_j - \dot{I}_{j0}$ 。这时可以利用追

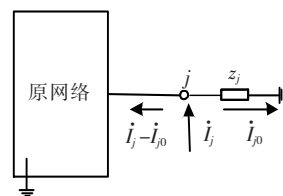


图4 追加接地连支示意

Figure 4 Adding chain of grounding branch

加对地连支前的阻抗矩阵元素写出:

$$\dot{V}_i = \sum_{m=1}^n Z_{im} \dot{I}_m - Z_{ij} \dot{I}_{j0} \quad (17)$$

式中 \dot{V}_i 为节点 i 的节点电压; Z_{im} 为节点 i 和系统中任意节点 m 之间的互阻抗; \dot{I}_m 为节点 m 的注入电流; Z_{ij} 为节点 i, j 的互阻抗; \dot{I}_{j0} 为对地连支上流过的电流。写出节点 j 电压方程为

$$\dot{V}_j = \sum_{m=1}^n Z_{jm} \dot{I}_m - Z_{jj} \dot{I}_{j0} \quad (18)$$

式中 \dot{V}_j 为节点 j 的节点电压; Z_{jj} 为节点 j 的自阻抗。阻抗为 z_j 连支的电压方程为

$$\dot{V}_j - 0 = \dot{I}_{j0} z_j \quad (19)$$

将式(18)代入式(19)得:

$$\dot{I}_{j0} = \frac{1}{Z_{jj} + z_j} \sum_{m=1}^n Z_{jm} \dot{I}_m \quad (20)$$

将式(20)代入(17)得:

$$\dot{V}_i = \sum_{m=1}^n \left(Z_{im} - \frac{Z_{ij} Z_{jm}}{Z_{jj} + z_j} \right) \dot{I}_m = \sum_{m=1}^n Z'_{im} \dot{I}_m \quad (21)$$

式中 Z'_{im} 为修正后节点阻抗矩阵中的节点 i, m 的互阻抗。所以有

$$Z'_{im} = Z_{im} - \frac{Z_{ij} Z_{jm}}{Z_{jj} + z_j} \quad (22)$$

当网络结构发生变化时,只需要通过运用式(16)、(22)修正原节点阻抗矩阵相应行和列的数值就可以得到网络结构变化之后的修正后节点阻抗矩阵。该方法避免了反复生成阻抗矩阵,仅需通过修正原阻抗矩阵的值得到修正后的阻抗矩阵,可以有效加快计算速度。

3 编程实现

为了验证该文结论,将文中方法编程实现,完成考虑复杂网络的支路短路电流直流分量计算模块的开发,如图 5 所示。该模块基于 BPA 数据平台,按照流程完成数据读取和处理、支路短路电流计算以及衰减时间常数的计算,不仅能对指定故障点进行短路计算,还具备扫描计算的功能。

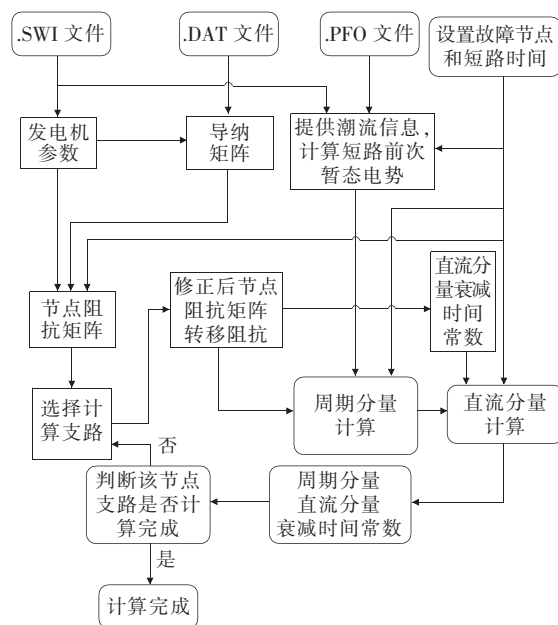


图 5 计算流程

Figure 5 Flowchart of calculation

4 案例分析

4.1 仿真对比

以 IEEE 39 节点系统为例^[19],如图 6 所示。为了验证该文方法的准确性,基于 EMTP 建立 10 机 39 节点的 IEEE 39 系统的电磁暂态仿真,节点 21、28 分别发生三相短路故障。当节点发生三相短路时,放置在与短路点相连的各支路上的 Probes 元件可以得到各支路的短路全电流,并通过全电流分离程序分离出各支路的短路电流直流分量,将 EMTP

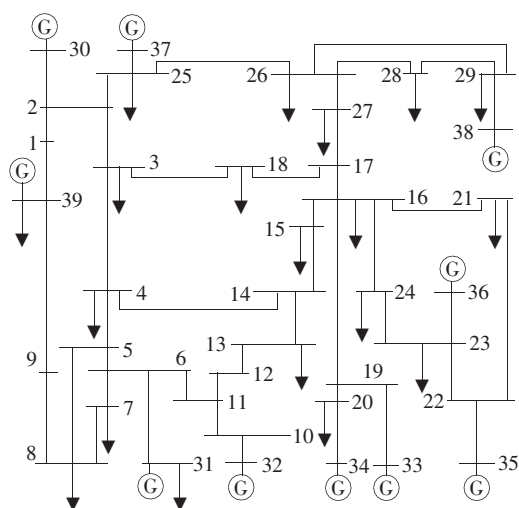


图 6 IEEE 39 系统

Figure 6 IEEE 39 system diagram

仿真值与该文方法计算结果进行对比。根据该文方法、EMTP 仿真结果拟合的各支路短路电流直流分量衰减曲线如图 7 所示,可知该文方法与 EMTP 仿真值吻合度好,最大相对误差不超过 8.97%,并且该系统中其他节点的相对误差均不超过 10%,具有较好的准确性。

为了验证该文方法的优越性,用 PSS/E 软件的 BKDY 模块在同系统中计算并提取节点 21、28 发生三相短路故障时与短路点相连各支路的直流分

量,并拟合出衰减时间常数。以 EMTP 仿真结果为基准,将该文方法、PSS/E 计算结果进行比较。节点 21、28 分别发生三相短路时各支路直流分量衰减时间常数如表 1 所示,可知该文方法计算结果与 EMTP 仿真值相对误差不超过 6.92%,计算精度高且相对误差波动小。PSS/E 计算结果相对误差波动大,该方法误差最小仅 0.8%,最大可达 22.39%,说明 PSS/E 的计算方法计算准确性波动较大。因此,该文方法优于 PSS/E 的计算方法。

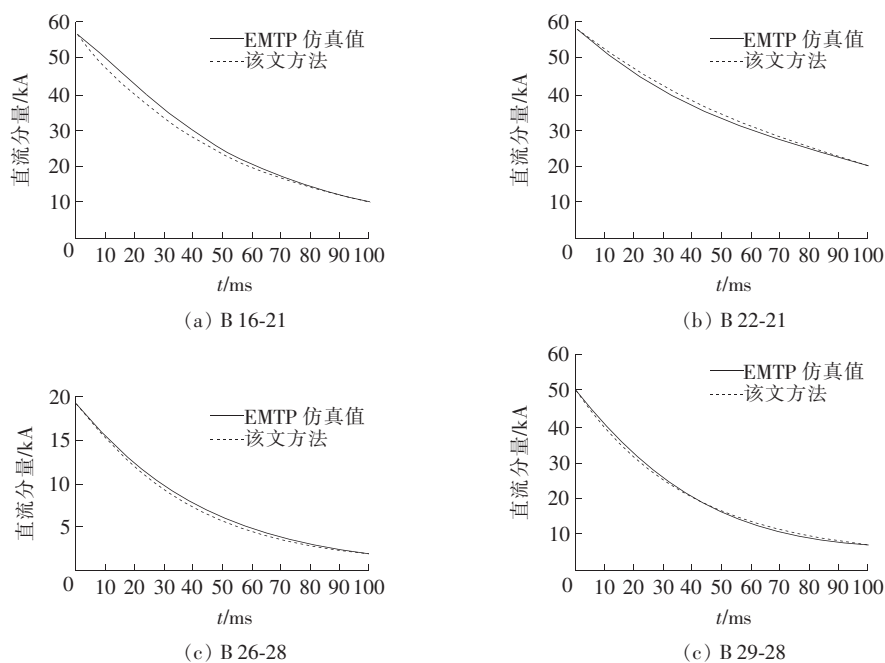


图 7 各支路短路电流直流分量衰减曲线

Figure 7 DC component attenuation curve of short circuit current of each branch

表 1 各支路直流分量衰减时间常数

Table 1 DC component decay time constant of each branch

短路点	支路	该文方法		PSS/E		EMTP/ ms
		时间常数/ms	相对误差/%	时间常数/ms	相对误差/%	
21	B 16-21	57.18	5.87	51.81	16.85	60.54
	B 22-21	92.82	-6.92	85.72	0.80	86.40
28	B 26-28	40.99	6.55	35.69	22.39	43.68
	B 29-28	45.55	-2.05	42.71	4.47	44.62

4.2 误差分析

该文对原网络节点阻抗矩阵进行支路追加是为了保证原网络与变换后的网络相互等效,故追加的支路阻抗与非待求支路的阻抗相同,由网络特性决

定,所以追加支路阻抗的大小对仿真计算的准确性并无影响。

由直流分量的产生原理可知,多机系统中直流分量是由衰减速度不同的多个成分组成的。本文提出的转移阻抗法求支路直流分量时,由于保留了直流分量多成分衰减的特性,所以和 EMTP 仿真结果相比,误差较小且波动不大。而影响 PSS/E 计算结果准确性的主要因素是各电源提供的直流分量成分占待求支路总直流分量的分布及衰减情况。

观察表 1 可知,B 22-21、B 26-28 分别为 PSS/E 计算结果相对误差最小(0.8%)和最大(22.39%)的支路,故以这 2 个支路为例,研究 10 个电源提供的

直流分量成分及其衰减情况。B 21 短路时支路 B 22-21 在前 80 ms 内电源直流分量成分及其衰减情况如表 2 所示,可知 B 22-21 支路直流分量主要由 GEN 35、GEN 36 提供,0 ms 时为 40.56、14.38 kA,分别占 B 22-21 支路直流分量的 69.4%和 24.6%,80 ms 时为 21.73、2.63 kA,分别占 B 22-21 支路直流分量的 88.0%、10.6%,且 GEN 35 所占比例较大且衰减较慢,导致 GEN 35 提供的直流分量份额始终占主导地位。B 28 短路时支路 B 26-28 在前 80 ms 内各电源直流分量成分及其衰减情况如表 3

所示,可知 B 26-28 支路直流分量多个成分间并无明显的优势成分,占份额最大的 GEN 37 成分衰减时间常数为 107.61 ms,0 ms 份额仅为 25%,80 ms 份额为 63%,其他成分衰减均较快。

由以上分析可见,PSS/E 计算结果误差较小的 B 22-21 支路,其直流分量在整个短路过程中有主导成分,而 PSS/E 计算结果误差较大的 B 26-28 支路在整个短路过程中没有明显的主导成分。该方法由于考虑了各成分间的差异,所以误差波动不大,普遍在可接受的范围内。

表 2 B 22-21 各电源直流分量成分及其衰减情况

Table 2 The element and decay of DC component of each power supply of B 22-21 kA

电源点	B 22-21 支路直流分量										B 22-21
	GEN 30	GEN 31	GEN 32	GEN 33	GEN 34	GEN 35	GEN 36	GEN 37	GEN 38	GEN 39	
0	0.51	0.41	0.57	1.21	0.55	40.56	14.38	0.37	0.39	0.03	58.44
10	0.41	0.32	0.44	0.88	0.40	37.51	12.39	0.24	0.27	0.02	52.47
20	0.33	0.24	0.33	0.64	0.29	34.70	10.52	0.16	0.18	0.01	47.11
30	0.26	0.19	0.25	0.47	0.21	32.09	8.80	0.10	0.12	0.01	42.30
40	0.21	0.14	0.19	0.34	0.15	29.68	7.25	0.07	0.09	0.01	37.98
50	0.17	0.11	0.15	0.25	0.11	27.46	5.87	0.04	0.06	0.00	34.10
60	0.14	0.08	0.11	0.18	0.08	25.40	4.64	0.03	0.04	0.00	30.62
70	0.11	0.06	0.08	0.13	0.06	23.49	3.57	0.02	0.03	0.00	27.49
80	0.09	0.05	0.06	0.10	0.04	21.73	2.63	0.01	0.02	0.00	24.68
时间常数/ms	45.45	37.48	36.45	31.51	31.08	128.14	59.94	23.53	26.49	23.24	92.82

表 3 B 26-28 各电源直流分量成分及其衰减情况

Table 3 The element and decay of DC component of each power supply of B 26-28 kA

电源点	B 26-28 支路直流分量										B 26-28
	GEN 30	GEN 31	GEN 32	GEN 33	GEN 34	GEN 35	GEN 36	GEN 37	GEN 38	GEN 39	
0	3.89	1.02	1.26	1.74	0.78	1.86	1.02	4.86	2.82	0.15	19.43
10	2.24	0.71	0.88	1.24	0.55	1.48	0.78	4.43	2.31	0.07	15.22
20	1.29	0.50	0.61	0.88	0.39	1.17	0.59	4.04	1.90	0.04	11.93
30	0.75	0.35	0.42	0.62	0.28	0.93	0.45	3.68	1.55	0.02	9.35
40	0.43	0.24	0.29	0.44	0.20	0.74	0.34	3.35	1.27	0.01	7.32
50	0.25	0.17	0.20	0.32	0.14	0.59	0.26	3.06	1.04	0.00	5.74
60	0.14	0.12	0.14	0.22	0.10	0.47	0.20	2.78	0.85	0.00	4.50
70	0.08	0.08	0.10	0.16	0.07	0.37	0.15	2.54	0.70	0.00	3.52
80	0.05	0.06	0.07	0.11	0.05	0.29	0.11	2.31	0.57	0.00	2.76
时间常数/ms	18.15	27.82	27.40	29.24	28.86	43.45	36.53	107.61	50.17	14.23	40.99

5 结语

该文从短路电流直流分量产生的原理出发,采用转移阻抗法求取了支路的直流分量及其衰减;利用支路追加法形成节点阻抗矩阵的原理,在已知原网络节点阻抗矩阵的情况下,根据系统短路时网络的特点,归纳出计及网络拓扑结构变化时修正节点阻抗矩阵的统一算法,并使变换后的网络能方便地进行短路时的支路直流分量及其衰减时间常数的理论计算,具有计算速度快、物理概念清晰、易于编程实现扫描计算等特点。同时,通过 IEEE 39 算例将该文方法计算所得与 EMTP 仿真值以及 PSS/E 的计算值进行对比,可知该文方法在计算支路短路电流直流分量时具有较高的计算精度,并优于 PSS/E 的计算方法。另外,还分析了 PSS/E 计算方法产生误差以及该文方法计算误差波动不大且普遍在可接受范围内的原因。

参考文献:

- [1] 章勇高,廖赞,苏永春,等.特高压交直流接入对江西电网短路电流的影响研究[J].电测与仪表,2018,55(10):34-39.
ZHANG Yonggao, LIAO Yun, SU Yongchun, et al. Study on the effect of AC/DC UHV on short-circuit current in Jiangxi power grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(10): 34-39.
- [2] 丁培,刘志远,罗金辉,等.基于 KEMA 电弧模型的 SF₆ 断路器直流分量开断能力研究[J].高压电器,2020,56(12):75-82.
DING Pei, LIU Zhiyuan, LUO Jinhui, et al. Research on DC component breaking capability of SF₆ circuit breaker based on KEMA arc model[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 75-82.
- [3] 吴建云.短路电流换路产生的直流分量问题分析[J].宁夏电力,2017(5):55-59+63.
WU Jianyun. Problem analysis of DC component caused by short-circuit current change[J]. Ningxia Electric Power, 2017(5): 55-59+63.
- [4] 吴建云.宁夏电网故障直流分量影响分析及对策研究[D].北京:华北电力大学,2017.
- [5] 常宝立,李海峰,付俊波,等.基于支路追加法的可控移相器对短路电流的影响研究[J].智慧电力,2019,47(7):98-103+116.
CHANG Baoli, LI Haifeng, FU Junbo, et al. Influence of TCPST on short circuit current based on branch additional method[J]. Smart Power, 2019, 47(7): 98-103+116.
- [6] 张旭航,黄阮明,曹炜,等.短路电流直流分量实用计算方法研究[J].高压电器,2019,55(5):169-174.
ZHANG Xuhang, HUANG Ruanming, CAO Wei, et al. Research on practical calculation method of DC component of short circuit current[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(5): 169-174.
- [7] 唐金锐,杨凡奇,侯婷婷,等.特高压交流变电站母线短路电流的影响因素分析[J].中国电力,2019,52(4):66-73.
TANG Jinrui, YANG Fanqi, HOU Tingting, et al. Affecting factors of short-circuit currents of busbar at UHV AC substation[J]. Electric Power, 2019, 52(4): 66-73.
- [8] 何泽宇,陈小月,张杏子,等.区域电网电磁暂态等值及短路电流直流分量分析[J].电测与仪表,2020,57(20):10-15.
HE Zeyu, CHEN Xiaoyue, ZHANG Xingzi, et al. Analysis of DC component of electromagnetic transient equivalent and short-circuit current in regional power grid [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(20): 10-15.
- [9] 范小红,孙士云,张雪娟,等.双馈风电场短路电流特性对距离保护的影响及保护策略研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(11):18-27.
FAN Xiaohong, SUN Shiyun, ZHANG Xuejuan, et al. Study on the influence of short-circuit current characteristics of a doubly-fed wind farm on distance protection and protection strategy [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 18-27.
- [10] 于传,徐修华,李先允,等.基于 dq0 变换的三相四线制系统电流综合检测方法[J].电力科学与技术学报,2019,34(4):173-179.
YU Chuan, XU Xiuhua, LI Xianyun, et al. Integrated current detection method for three-phase four wire sys-

- tem based on instantaneous power theory[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4):173-179.
- [11] GB/T 15544—2013. 三相交流系统短路电流计算标准[S].
- [12] NB/T 35043—2014. 水电工程三相交流系统短路电流计算[S].
- [13] 曹炜,陈春阳,周明. 考虑直流分量的短路电流衰减实用计算方法研究[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 4054-4060.
- CAO Wei, CHEN Chunyang, ZHOU Ming. Study on practical calculation method of attenuated short-circuit current with the DC component considered[J]. Power System Technology, 2017, 41(12):4054-4060.
- [14] 曹炜,丁北平,凌晓波,等. PSS/E BKDY 短路计算模块评述[J]. 华东电力, 2011, 39(2):271-274.
- CAO Wei, DING Beiping, LING Xiaobo, et al. Evaluation of PSS/E BKDY Short-circuit current calculation module[J]. East China Electric Power, 2011, 39(2): 271-274.
- [15] 靳希,段开元,张文青. 基于 PSS/E 的短路电流衰减影响因素分析[J]. 电力科学与技术学报, 2010, 25(3): 61-65.
- JIN Xi, DUAN Kaiyuan, ZHANG Wenqing. Analysis of influencing factors on short-circuit decay base on PSS/E[J]. Journal of Electric Power Science And Technology, 2010, 25(3):61-65.
- [16] 乐全明,郁惟镛,杜俊红. 一种形成节点阻抗矩阵的改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2):37-42.
- YUE Quanming, YU Weiyong, DU Junhong. An improved novel algorithm for building z-matrix[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2):37-42.
- [17] 陈明,李银红,石东源,等. 节点导纳矩阵和阻抗矩阵的互感支路组整体追加方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(21):94-101.
- CHEN Ming, LI Yinhong, SHI Dongyuan, et al. Research on mutual inductance branch building method of node-admittance matrix and node-impedance matrix based on branch group[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(21):94-101.
- [18] 梁辰,刘道伟,焦彦军,等. 基于加速支路追加的戴维南等值参数在线计算[J]. 电网技术, 2017, 41(9):2972-2978.
- LIANG Chen, LIU Daowei, JIAO Yanjun, et al. Online calculation of thevenin equivalent parameters based on accelerated branch-adding[J]. Power System Technology, 2017, 41(9):2972-2978.
- [19] Lezama G, Ramon F. Prediction and control of transient instability using wide area phasor measurements [D]. Canada: University of Maniboba, 2012.