

基于电压为线性函数的开断潮流计算及开断函数选择

吴成业¹, 李飞¹, 刘光晔²

(1. 安徽工业大学 电气与信息工程学院, 安徽 马鞍山 243032;
2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:为进行快速开断潮流计算, 可将电力系统节点电压展开为关于开断支路导纳的泰勒级数, 若采用简单的线性开断函数, 由于节点电压与支路导纳之间有很强的非线性关系, 电压泰勒级数收敛非常缓慢。通过严格的数学推理, 提出一种使节点电压与开断支路导纳呈线性关系的开断函数, 并证明该开断函数的存在性及唯一性。由线性电压函数可快速精确地计算开断系统的潮流。对IEEE 14节点系统的仿真结果验证了所提方法的正确性。

关键词:开断潮流计算; 静态安全; 开断函数; 线性电压函数

中图分类号:TM 71

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202008026

0 引言

静态安全分析^[1]是电力系统安全分析的一个重要组成部分, 而N-1安全校验是最常见的静态安全评估方法之一^[2-3], 旨在预想事故发生后, 根据电压越限或者传输功率过载程度进行排序, 找到严重的事故集, 为后续预防控制提供帮助, 其实质是对系统进行开断潮流计算的问题。

对于大规模电力系统, 为保证系统静态安全分析的快速性, 往往先采用近似的开断潮流算法对电力系统中所有的预想事故进行计算, 如直流法^[4-5]、补偿法^[6-7]、灵敏度分析法^[8-9]等。然后对预想事故进行筛选, 再按事故的严重程度从高到低依次进行精确的开断潮流计算^[10]。现有的静态安全分析方法大多致力于如何更快速地筛选事故, 无法避免对严重事故集的二次精确计算。且近似的开断潮流计算结果精度较低, 很可能产生遮蔽现象, 造成预想事故的误排序。因此, 目前缺少一种能精确而快速筛选预想事故, 且因精度足够高而无需进行二次校验的静态安全分析方法。

针对上述问题, 本文提出一种精确而快速的开断潮流算法。开断潮流计算本质上可认为是一个以节点电压为函数、开断支路导纳为变量的数学问题, 而泰勒级数法是解决该类数学问题十分有效的方法^[11-14]。当连续切除开断支路, 即认为开断支路导纳是线性函数时, 节点电压与开断支路导纳之间有很强的非线性关系, 电压泰勒级数收敛很慢, 需要较高阶的级数才能拟合出节点电压函数。本文研究支

路开断函数的选择, 通过严格的数学推导找到使节点电压为线性函数的支路开断函数, 且该开断函数是唯一的。

本文首先用泰勒级数法对一个简单直流系统进行支路开断电压计算和开断函数的选择分析, 然后将该方法应用于复杂交流电力系统的开断潮流计算。当采用使电压泰勒级数为线性函数的支路开断函数时, 电压计算结果的精度很高, 接近迭代潮流算法。由于只需要计算电压的一阶导数和支路开断函数中的系数, 本文方法的计算速度也很快。若采用本文方法对预想事故进行精确扫描, 则可以节省一般静态安全分析方法中的精确校正过程。

1 简单直流系统的支路开断电压计算

为了清晰地说明问题, 本文首先研究图1所示简单直流电路的支路开断电压计算。

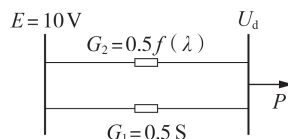


图1 简单直流系统电路图

Fig.1 Circuit of a simple DC system

图1中电导 G_2 对应的支路为需要开断的支路, $f(\lambda)$ 为支路开断函数, λ 为虚拟的开断参数。开断函数的物理意义为支路由正常运行到断开这一过程所选择的过渡方式, 而其函数值描述了这一过程的进行程度。

由图1可得到电压 U_d 与恒功率 P 之间的数学关系为:

$$P = (10U_d - U_d^2)(1 + f(\lambda))/2 \quad (1)$$

令开断参数 λ 取值为0与1分别表示线路正常和断开, 则开断函数应满足式(2), 且在定义域区间 $[0, 1]$ 连续可导。

收稿日期:2020-01-23;修回日期:2020-06-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577053);国家自然科学基金青年基金资助项目(61903003)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577053) and the Youth Fund of the National Natural Science Foundation of China(61903003)

$$\begin{cases} f(0) = 1 \\ f(1) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

设初始电压 $U_0 = 9 \text{ V}$ 、恒功率 $P = 9 \text{ W}$ 。用泰勒级数法求开断电压 U 时,先分析开断函数为最简单线性函数时的情况。令:

$$f(\lambda) = 1 - \lambda \quad (3)$$

对式(1)两边同时进行 1—3 阶求导,结合式(3)可得到电压关于开断参数在初始点处的 1—3 阶导数分别为 $a'_1 = -0.5625$ 、 $a'_2 = -0.6416$ 、 $a'_3 = -1.1144$,从而可得到电压关于开断参数的泰勒级数为:

$$U_d(\lambda) = U_0 + a'_1 \lambda + (a'_2 \lambda^2)/2 + (a'_3 \lambda^3)/6 \quad (4)$$

代入 $\lambda = 1$ 可得到开断电压 $U_d(1) \approx 7.9310 \text{ V}$,而由式(1)解得开断电压的真实解为 $U_1 \approx 7.6458 \text{ V}$ (另一个解位于 PV 曲线下半区域,为电压不稳定点),误差较大。这是由当采用线性开断函数时,电压与导纳呈强非线性关系导致的。

现假设存在一个开断函数 $f(\lambda)$,使电压关于开断参数的函数为线性函数,则有:

$$U_d(\lambda) = a\lambda + b \quad (5)$$

其中, a 、 b 为待定常数。

由式(1)、(2)、(5),再结合 $P = 9 \text{ W}$ 可推导出新开断函数 $f(\lambda)$ 为:

$$f(\lambda) = \frac{(8 - 2.7085\lambda)^2 - 28}{100 - (8 - 2.7085\lambda)^2} \quad (6)$$

可见这样的开断函数是存在且唯一的。推导过程见附录 A。

再由式(6)和式(1)可得到电压 U_d 关于开断参数 λ 在初始点的一阶导数为 $d' = -1.3542$,由于式(5)中 $a = d'$ 、 $b = U_0$,则电压关于开断参数的线性函数为:

$$U_d(\lambda) = -1.3542\lambda + 9 \quad (7)$$

代入 $\lambda = 1$ 可得到开断电压 $U_d(1) \approx 7.6458 \text{ V}$,这与真实的开断电压值 $U_1 \approx 7.6458 \text{ V}$ 完全相等。

电压 U_d 、开断支路导纳 Y_d 、开断参数 λ 之间的数学函数关系如图 2 所示。其中电压 U_d 是关于 λ 的复合函数,且这个复合函数的线性程度随开断函数 $f(\lambda)$ 的变化而变化。对于图 1 中的简单直流系统,可通过严格的等式关系找到使电压复合函数 $U_d(\lambda)$ 为线性函数的支路开断函数 $f(\lambda)$,由此计算出的开断电压就是真实开断电压。而对于复杂的交流电力

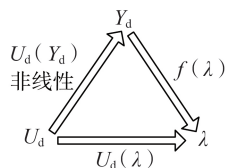


图 2 参量间的函数关系

Fig.2 Functional relationship among parameters

系统,则只能通过迭代的方法得到使电压复合函数 $U_d(\lambda)$ 高度线性化的支路开断函数 $f(\lambda)$,从而得到高精度的开断电压计算结果。

2 复杂电力系统的开断潮流计算

2.1 支路开断函数的选择

复杂交流电力系统的支路开断电压计算原理如图 3 所示。图 3(a)中, Z_{km} 、 I_{km} 分别为需要研究的开断支路所对应的阻抗和流经的电流; Z' 为电力网络中其余支路所组成的阻抗矩阵。则网络中任意节点的正常电压可用阻抗矩阵 Z' 的元素表示为^[15]:

$$U_i = \sum_{j=1}^n Z'_{ij} I_j + (Z'_{im} - Z'_{ik}) I_{km} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

其中, n 为网络节点数; I_j 为恒定的节点注入电流。由于 Z' 的元素也为常数,因此式(8)可简写为:

$$U_i = \alpha_i + \beta_i I_{km} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

其中, α_i 、 β_i 为常量系数。可见节点电压 U_i 与支路 $k-m$ 电流 I_{km} 为线性关系。

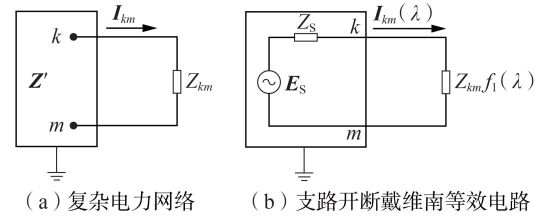


图 3 电力系统支路开断电压计算原理

Fig.3 Calculation principle of branch breaking voltage for power system

现用一个开断函数 $f_1(\lambda)$ 乘以阻抗 Z_{km} 来模拟支路 $k-m$ 的开断过程,则函数 $f_1(\lambda)$ 应满足:

$$\begin{cases} f_1(0) = 1 \\ f_1(1) = \infty \end{cases} \quad (10)$$

为了得到电压 U_i 与开断函数 $f_1(\lambda)$ 之间的数学关系,研究图 3(b)中的戴维南等效电路。图中 E_s 和 Z_s 分别为从节点 k 、 m 看进去的戴维南等效电势和等效阻抗,且 $E_s = E_s \angle 0$ 。则有:

$$I_{km}(\lambda) = E_s / (Z_s + Z_{km} f_1(\lambda)) \quad (11)$$

再将式(11)代入式(9)中,可得到电压 U_i 与开断函数 $f_1(\lambda)$ 之间的数学关系为:

$$U_i = \alpha_i + \frac{\beta_i E_s}{Z_s + Z_{km} f_1(\lambda)} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

现研究使电压 U_i 关于开断参数 λ 为线性函数的开断函数 $f_1(\lambda)$,即:

$$\alpha_i + \frac{\beta_i E_s}{Z_s + Z_{km} f_1(\lambda)} = A_i \lambda + B_i \quad (13)$$

其中, A_i 、 B_i 为待定的常量系数。由式(13)结合初值条件式(10)可推导出 $f_1(\lambda)$ 的表达式如式(14)所示,且该表达式是唯一的,详细的数学推导见附录 B。

$$f_1(\lambda) = (1 + C\lambda)/(1 - \lambda), C = Z_s/Z_{km} \quad (14)$$

因此,在复杂电力系统中,能使节点电压关于开断支路导纳为线性函数的唯一开断函数为:

$$f(\lambda) = (1 - \lambda)/(1 + C\lambda) \quad (15)$$

令开断支路导纳为 Y_{km} , 则其关于 λ 的函数为:

$$Y_{km}(\lambda) = Y_{km} f(\lambda) \quad \lambda \in \{0, 1\} \quad (16)$$

需说明的是, $f(\lambda)$ 中系数 C 是一个复数。由于实际计算中,系统的戴维南等效阻抗是未知的,因此系数 C 也未知。可通过设定初值再迭代修正的方法得到 C 的近似值。

2.2 节点电压关于开断参数的一阶导数

为了求得节点电压 U_i 关于开断参数 λ 的泰勒级数,需要得到 U_i 关于 λ 在正常运行点处的各阶导数。由于采用非线性支路开断函数 $f(\lambda)$, 因此电压的泰勒级数只含常数项和一次项。常数项的值即为系统正常运行时的节点电压值,而一次项的系数即为 U_i 关于 λ 在正常运行点处的一阶导数。

图4为开断支路 $k-m$ 的 II 型等值电路。由图中可知,断开 1 回路会同时断开 2 条对地的导纳支路。在支路 $k-m$ 的开断过程中,原导纳矩阵 Y 中将有 4 个元素是 λ 的函数,即潮流方程中也含有开断参数 λ 。

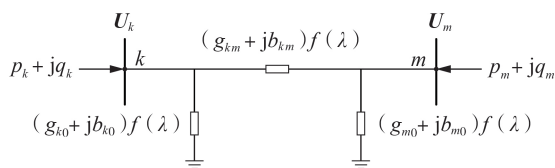


图4 开断支路 $k-m$ 的 II 型等值电路

Fig.4 II type equivalent circuit of breaking branch $k-m$

设直角坐标系下电力系统的潮流方程为:

$$W = F(U, \lambda) \quad (17)$$

其中, U 为系统中所有未知的节点电压量。将式(17)两边同时对支路开断参数 λ 求导得:

$$\frac{dW}{d\lambda} = \frac{\partial F}{\partial \lambda} + \frac{\partial F}{\partial U} \frac{dU}{d\lambda} \quad (18)$$

由于注入功率不变(对于断开电源支路,注入功率变化情况将在后文另外说明), $\partial F/\partial U$ 为潮流雅可比矩阵 J 的相反数,同时有:

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda} = f'(\lambda)H \quad (19)$$

$$H = [0 \cdots 0 \ p_k \ q_k \ 0 \cdots 0 \ p_m \ q_m \ 0 \cdots 0]^T \quad (20)$$

H 的非零元素正好是分别注入开断支路 $k-m$ 两端的功率,如图4所示。具体表达式见附录C。

从而可求得电压关于开断参数的导数为:

$$dU/d\lambda = f'(\lambda)J^{-1}H \quad (21)$$

令:

$$a_i = \left. \frac{dU_i}{d\lambda} \right|_{\lambda=0} \quad (22)$$

可得到电压的线性函数为:

$$U_i(\lambda) = U_i^{(0)} + a_i \lambda \quad (23)$$

其中, $U_i^{(0)}$ 为节点 i 正常运行时的初始电压。

将 $\lambda=1$ 代入式(23),可求得节点 i 的开断电压为:

$$U_i = U_i^{(0)} + a_i \quad (24)$$

可见,整个开断潮流计算过程只需用到已知的雅可比矩阵逆矩阵和初始潮流的电压计算结果,因此计算速度很快。而开断电压的计算精度则取决于开断函数 $f(\lambda)$ 中系数 C 的精确程度。

2.3 开断函数系数 C 的求取与修正

由于系数 C 与戴维南电路中的等效阻抗有关,重新研究图3(b)中各个变量间的关系,可得:

$$U_{km}^{(0)} = U_k^{(0)} - U_m^{(0)} = E_s Z_{km} / (Z_s + Z_{km}) \quad (25)$$

假设已经得到使电压为线性函数的开断函数 $f(\lambda)$ 和系数 C , 则支路断开后的电压关系为:

$$E_s = \left(\left. \frac{dU_k}{d\lambda} \right|_{\lambda=1} + U_k^{(0)} \right) - \left(\left. \frac{dU_m}{d\lambda} \right|_{\lambda=1} + U_m^{(0)} \right) = a_k + U_k^{(0)} - a_m - U_m^{(0)} \quad (26)$$

由式(25)、(26)可推导出系数 C 的另一表达式为:

$$C = \frac{Z_s}{Z_{km}} = \frac{a_k - a_m}{U_k^{(0)} - U_m^{(0)}} \quad (27)$$

由此,本文得到系数 C 的迭代计算方法如下。

(1) 计算初始潮流,设定初值 $C_l = 1, l = 0$ (l 为迭代次数, C_l 为每次迭代后系数 C 的值)。其原因是支路流过的功率越大,线路开断对系统的扰动越大,电压函数的非线性程度也越强,为了考虑这种最严重的情况, C 的初值应选择使支路流过极限功率时的值,即 $Z_s = Z_{km}, C = 1$ 。

(2) 由式(22)求出开断支路两端的电压关于开断参数 λ 的一阶导数 a_k, a_m , 令 $l = l + 1$ 。

(3) 由式(27)求出函数系数 C_l , 令 $C = C_l$ 。将求出的 C_l 与 C_{l-1} 进行数值比较,若基本相等,则执行下一步,否则回到步骤(2)。

(4) 由式(22)求出各节点电压关于开断参数 λ 的一阶导数 a_i , 再由式(24)求出各节点在支路 $k-m$ 断开后的电压。

上述步骤也是本文开断潮流计算的步骤,其主要计算在于开断函数系数 C 的迭代求取。而每次迭代只有式(21)中的 $f'(\lambda)$ 与式(27)中 a_k, a_m 这3个参数是变化的,而矩阵 J 和 H 不变。可见本文方法求开断潮流的计算量是很少的。

应用本文方法可以对预想事故集进行精确而快速的扫描,从而直接判断开断潮流是否满足安全要求,省略了计算量较大的精确校正过程。

事实上,对已经求得开断潮流结果,本文可通

过电压泰勒级数的高次项进行进一步修正。通过对潮流方程式(17)求2阶和3阶导数,可以得到电压关于开断参数的2阶和3阶导数如式(28)所示。

$$\begin{cases} \frac{d^2 U}{d\lambda^2} = J^{-1} \left(f''(\lambda) H + 2f'(\lambda) \frac{dH}{d\lambda} + \frac{dJ}{d\lambda} \frac{dU}{d\lambda} \right) \\ \frac{d^3 U}{d\lambda^3} = J^{-1} \left[f'''(\lambda) H + 3f''(\lambda) \frac{dH}{d\lambda} + 3f'(\lambda) \frac{d^2 H}{d\lambda^2} + \right. \\ \left. \frac{d^2 J}{d\lambda^2} \frac{dU}{d\lambda} + \frac{dJ}{d\lambda} \frac{d^2 U}{d\lambda^2} \right] \end{cases} \quad (28)$$

需说明的是,雅可比矩阵 J 关于 λ 的导数由两部分构成:一是 J 关于开断导纳求导后再乘以开断函数的导数 $f'(\lambda)$,这部分可通过等式关系变换成与 H 相关的形式;二是 J 中的电压元素关于 λ 求导,这部分用 $dJ/d\lambda$ 、 $d^2 J/d\lambda^2$ 表示。

由式(28)得到电压泰勒级数的二、三次项系数:

$$\begin{cases} b_i = \frac{d^2 U_i}{d\lambda^2} \Big|_{\lambda=0} \\ c_i = \frac{d^3 U_i}{d\lambda^3} \Big|_{\lambda=0} \end{cases} \quad (29)$$

在电压泰勒级数中,令 $\lambda = 1$,可得到修正后的支路开断电压结果:

$$U_i = U_i^{(0)} + a_i + b_i/2 + c_i/6 \quad (30)$$

在基于电压为线性函数的开断潮流快速精确扫描后,可用式(30)对所得结果进行快速而更精确的校验。

2.4 电源开断的潮流计算

电源支路开断过程中,电力系统节点导纳矩阵不变,变化的是节点注入功率。首先可类似用一个电源开断函数 $f_2(\lambda)$ 来模拟电源的开断过程,然后将潮流方程两边同时对开断参数求高阶导数,最后由电压泰勒级数可快速求出电源断开后的精确电压值。

分析结果发现,泰勒级数法的计算精度对电源开断函数 $f_2(\lambda)$ 的依赖性不强。当 $f_2(\lambda)$ 取简单的线性函数,如 $f_2(\lambda) = 1 - \lambda$ 时,通过3阶泰勒级数拟合也能得到精确度较高的开断潮流结果。这是因为电源的开断不会影响系统网络结构,只会使潮流方程初值大小发生变化。

3 仿真算例

采用本文方法和牛顿-拉夫逊法对 IEEE 14 节点系统的每条支路分别进行开断潮流计算,比较结果发现,电压误差最大的节点总是开断支路所在的2个节点,因此表1中仅列出这2个节点的电压值,最大误差结果如表2所示(表中幅值为标么值)。

观察表1和表2中结果可以发现,本文方法计算

表1 本文方法的支路开断潮流计算结果与开断函数系数 C

Table 1 Calculation results of branch breaking power flow and breaking function coefficient C of proposed method

支路 $k-m$	节点 k 电压		节点 m 电压		C
	幅值	相角 / rad	幅值	相角 / rad	
1-2	1.0600	0	1.0346	-0.6270	1.0032+j0.0773
2-3	1.0433	-0.0770	1.0097	-0.4450	1.5662+j0.1544
2-4	1.0450	-0.0789	1.0077	-0.2328	0.6385+j0.0111
1-5	1.0600	0	1.0062	-0.2681	0.7253-j0.0201
2-5	1.0450	-0.0785	1.0111	-0.1870	0.6107+j0.0470
3-4	1.0096	-0.2732	1.0225	-0.1629	1.5711+j0.2180
4-5	1.0026	-0.2385	1.0091	-0.1016	4.0112+j0.0454
5-6	1.0174	-0.1643	1.0648	-0.4750	1.6620-j1.1712
4-7	1.0153	-0.1764	1.0648	-0.3369	1.2395-j0.8793
4-9	1.0181	-0.1788	1.0541	-0.2902	0.3360-j0.1850
6-11	1.0698	-0.2376	1.0330	-0.2830	2.3154+j0.5429
6-12	1.0701	-0.2474	1.0272	-0.2786	1.4582-j0.4087
6-13	1.0702	-0.2412	0.9982	-0.2972	2.3176-j0.1418
7-9	1.0672	-0.1766	1.0307	-0.3303	4.5188-j0.2647
9-10	1.0638	-0.2536	1.0255	-0.2826	6.8513+j0.8978
9-14	1.0640	-0.2504	0.9967	-0.3249	2.3307+j0.1701
10-11	1.0455	-0.2709	1.0634	-0.2473	2.4608+j0.4257
12-13	1.0590	-0.2600	1.0488	-0.2656	1.3179+j0.5116
13-14	1.0552	-0.2536	1.0195	-0.2988	1.6730+j0.2130

表2 牛顿-拉夫逊法的支路开断潮流计算结果及与本文方法比较

Table 2 Calculation results of branch breaking power flow of Newton-Raphson method and comparison with proposed method

支路 $k-m$	节点 k 电压		节点 m 电压		最大误差	
	幅值	相角 / rad	幅值	相角 / rad	幅值	相角 / rad
1-2	1.0600	0	1.0450	-0.6365	0.0104	0.0095
2-3	1.0450	-0.0819	1.0100	-0.4300	0.0017	0.0049
2-4	1.0450	-0.0786	1.0082	-0.2312	0.0005	0.0016
1-5	1.0600	0	1.0074	-0.2628	0.0012	0.0053
2-5	1.0450	-0.0784	1.0113	-0.1863	0.0002	0.0007
4-9	1.0181	-0.1788	1.0541	-0.2902	0	0
9-10	1.0639	-0.2545	1.0254	-0.2833	0.0001	0.0009
9-14	1.0639	-0.2516	0.9969	-0.3254	0.0002	0.0005

开断潮流的精度高。另外,牛顿-拉夫逊法计算全部支路的开断潮流耗时 3.0696 s,而本文方法的总耗时为 0.2709 s,可见本文方法的计算速度快。因此,本文方法可直接用于预想事故集的快速精确扫描,并判断开断潮流是否满足静态安全要求。

另外,观察表2中支路1-2的结果发现,其最大误差较其他支路的结果要大。这是由于支路1-2流过的功率很大,该支路的开断会对系统产生较大的扰动,所以支路开断函数系数 C 收敛较慢,电压函数的非线性程度较高。可通过电压泰勒级数的二、三次项进行修正。支路1-2发生故障时,对应式(30)中节点2的电压泰勒级数各项系数如表3所示(表中数据均为标么值)。

表3 节点2电压泰勒级数各项系数

Table 3 Coefficients of voltage Taylor series for Bus 2

电压	常数项	一次项	二次项	三次项
实部	1.041 1	-0.203 3	0.012 5	-0.008 4
虚部	-0.907 0	0.300 0	-0.013 8	0.002 2

根据表3结果,结合式(30)可得节点2在支路断开后的电压实部为0.8419 p.u.,虚部为-0.6186 p.u.,电压 $U_2 = 1.0447 \angle -0.6337$ p.u.,这与真实电压结果几乎一致。

4 结论

(1)本文提出一种基于电压为线性函数的快速精确开断潮流计算方法。通过严格的数学推理找到使节点电压关于支路开断参数 λ 为线性关系的唯一开断函数,并建立求取支路开断函数系数 C 的迭代方法。IEEE 14节点系统的仿真结果验证了本文方法的正确性。

(2)应用本文方法可快速而精确地对预想事故集进行扫描,并直接判断开断潮流是否满足静态安全要求,节省了传统静态安全分析方法中的校正过程。另外,本文方法可以很方便地用泰勒级数二、三次项对所得结果进行进一步的精确修正。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 傅旭. 电力系统静态安全混合控制方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 124-130.
FU Xu. Hybrid control of power system static security[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 124-130.
- [2] 杨溢, 郭志忠. 双端电磁环网的 $N-1$ 静态安全分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(23): 6401-6408.
YANG Yi, GUO Zhizhong. $N-1$ static security analysis on two-terminal electromagnetic loop of power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23): 6401-6408.
- [3] 马瑞, 王大翔. 考虑天然气 $N-1$ 的多能流系统静态安全耦合分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1627-1636.
MA Rui, WANG Dashuo. Static security coupling analysis of multi-energy flow system considering natural gas system $N-1$ contingency[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1627-1636.
- [4] 袁智强, 陈宇晨, 刘涌, 等. 改进直流法在静态安全分析中的应用[J]. 继电器, 2003, 31(7): 23-27, 80.
YUAN Zhiqiang, CHEN Yuchen, LIU Yong, et al. Application of the improved direct current load flow algorithm on static security analysis[J]. Relay, 2003, 31(7): 23-27, 80.
- [5] 叶剑, 陶玉华. 一种基于直流法潮流的快速潮流计算方法[J]. 华北电力技术, 2010(5): 47-50.
YE Jian, TAO Yuhua. A fast power flow calculation method based on DC power flow method[J]. North China Electric Power, 2010(5): 47-50.
- [6] 阳育德, 冯彦维, 韦化. 基于补偿法的预防性静态安全控制[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12): 47-54.
YANG Yude, FENG Yanwei, WEI Hua. Preventive static security control based on compensation method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 47-54.

- [7] 阳育德, 陶琢, 刘辉, 等. 电力系统静态安全最优潮流并行计算方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 99-105.
YANG Yude, TAO Zhuo, LIU Hui, et al. Parallel computation methods for static security-constrained optimal power flow of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 99-105.
- [8] 杨冬, 周勤勇, 刘玉田. 基于灵敏度分析的限流方案优化决策方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 111-118.
YANG Dong, ZHOU Qinyong, LIU Yutian. Short circuit current limiting strategy optimization based on sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 111-118.
- [9] 张哲, 杨航, 尹项根, 等. 电网运行风险在线评估中基于灵敏度分析的负荷削减模型[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 90-95.
ZHANG Zhe, YANG Hang, YIN Xianggen, et al. Load shedding model based on sensitivity analysis in on-line power system operation risk assessment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 90-95.
- [10] 鲁广明, 谢昶, 吕颖, 等. 基于分层区间数可能度排序的不确定静态安全分析[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1048-1054.
LU Guangming, XIE Chang, LÜ Ying, et al. Static security analysis with uncertainty using hierarchical probability degree ordering of interval numbers[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1048-1054.
- [11] 容文光, 吴政球, 匡文凯, 等. 基于泰勒级数展开的 $N-1$ 牛顿拉夫逊法快速潮流修正计算[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 42-46.
RONG Wenguang, WU Zhengqiu, KUANG Wenkai, et al. Taylor series expansion based $N-1$ fast power flow revision calculation using Newton-Raphson method[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 42-46.
- [12] 钟浩, 吴政球, 刘青, 等. 基于曲线拟合的泰勒级数电网故障后电压快速准确计算[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2010, 37(8): 40-44.
ZHONG Hao, WU Zhengqiu, LIU Qing, et al. Curve fitting and Taylor series based fast post-contingency voltage estimation[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2010, 37(8): 40-44.
- [13] 刘光晔, 汪洋, 彭丽, 等. 应用非线性等值原理解析计算电压稳定临界点[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 129-136.
LIU Guangye, WANG Yang, PENG Li, et al. Voltage stability critical point analytical algorithm based on nonlinear equivalent principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 129-136.
- [14] 吴成业, 刘光晔, 罗经纬. 基于泰勒级数的PV曲线求取及参变量选择分析[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1225-1229.
WU Chengye, LIU Guangye, LUO Jingwei. PV curve calculation based on Taylor series and parameter selection analysis[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1225-1229.
- [15] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析——上[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2016: 78-79.

作者简介:



吴成业

吴成业(1993—),男,湖南娄底人,助理教授,硕士,主要研究方向为电力系统运行(E-mail: wcyinhnu@126.com);

李飞(1988—),男,安徽阜阳人,讲师,博士,主要研究方向为算法优化;

刘光晔(1960—),男,湖南武冈人,教授,博士,主要研究方向为电力系统分析与控制。

(编辑 王锦秀)

(下转第211页 continued on age 211)

- [19] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: single shot multi-box detector [C] // European Conference on Computer Vision. Amsterdam, Netherlands: ECCV, 2016: 21-37.
- [20] LIN T Y, GOYAL P, ROSS G, et al. Focal loss for dense object detection [C] // International Conference on Computer Vision. Venice, Veneto, Italy: IEEE, 2017: 2999-3007.



赵振兵

方向为电力视觉技术(E-mail: zhaozhenbing@ncepu.edu.cn);

李延旭(1996—),男,北京人,硕士研究生,主要研究方向为电力设备检测(E-mail: littlebirdAI@126.com);

戚银城(1968—),男,河南商水人,教授,博士,主要研究方向为电力系统通信与信息处理(E-mail: qiych@126.com)。

(编辑 任思思)

作者简介:

赵振兵(1979—),男,江苏宿迁人,副教授,博士,主要研究

Insulator defect detection method based on dynamic focus loss function and sample balance method

ZHAO Zhenbing¹, LI Yanxu¹, QI Yincheng¹, KONG Yinghui¹, NIE Liqiang²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. School of Computer Science and Technology, Shandong University, Qingdao 266237, China)

Abstract: In the task of insulator defect detection in aerial transmission lines, there are problems such as the sample numbers imbalance among different defect types and the inefficient learning of difficult samples, aiming at which, the dynamic focus loss function and the sample balance method based on second-order moments are proposed. Firstly, the attenuation factor of the focus loss function is dynamically solved according to the change of the difficult and simple samples distribution in the forward propagation. Then the discrete value of sample loss is used to locate the boundary of the difficult simple samples and obtain a difficult sample set. Finally, in the back propagation process, the contribution rate distribution of the learning samples is balanced according to the second-order moments of different sample losses. The experimental results show that the proposed multi-type insulator defect detection method can effectively learn the depth features of different samples, and its performance is significantly improved compared with other methods.

Key words: multi-type insulator defect; samples balance; loss function; deep learning; object detection

(上接第 204 页 continued from page 204)

Breaking power flow calculation based on linear voltage function and breaking function selection

WU Chengye¹, LI Fei¹, LIU Guangye²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The node voltage of power system can be expanded to Taylor series of breaking branch admittance for fast breaking power flow calculation, if a simple linear breaking function is adopted, the voltage Taylor series converges very slowly because of the strong nonlinear relationship between node voltage and branch admittance. Through strict mathematical reasoning, a breaking function which makes the node voltage linearly related to the breaking branch admittance is proposed, and its existence and uniqueness are verified. The power flow of breaking system can be calculated fast and accurately by the linear voltage function. The simulative results of IEEE 14-bus system verify the correctness of the proposed method.

Key words: breaking power flow calculation; static security; breaking function; linear voltage function

附录 A:

由式 (1)、(2)、(5)，结合 $P=9W$ 可得 $9=\frac{1}{2}(10U_d-U_d^2)[1+f(\lambda)]$ 。所以

$$U_d^2-10U_d+\frac{18}{1+f(\lambda)}=0, \text{ 解得 } U_{1,2}=5\pm\frac{1}{2}\sqrt{100-\frac{72}{1+f(\lambda)}}, \text{ 由于 } U_d \text{ 是关于 } \lambda \text{ 的线性}$$

函数，因此必定满足 $100-\frac{72}{1+f(\lambda)}=(c\lambda+d)^2$ ， c 、 d 为待定常数。

结合 $f(0)=1$ 、 $f(1)=0$ ，可得出 $c=-2.7085$ 、 $d=8$ ，因此有

$$100-\frac{72}{1+f(\lambda)}=(8-2.7085\lambda)^2, \text{ 等式变换得 } f(\lambda)=\frac{(8-2.7085\lambda)^2-28}{100-(8-2.7085\lambda)^2}, \text{ 并且 } f(\lambda)$$

唯一。

附录 B:

$$\because \alpha_i + \frac{\beta_i E_s}{Z_s + Z_{km} f_1(\lambda)} = A_i \lambda + B_i, \quad A_i、B_i \text{ 待定}$$

$$\therefore f_1(\lambda) = \frac{[\beta_i E_s - Z_s(B_i - \alpha_i)] - Z_s A_i \lambda}{Z_{km} A_i \lambda + Z_{km}(B_i - \alpha_i)}$$

由于一个待定的常数与其他已知的非零常数进行加减乘除运算后，仍然是一个待定的常数，因此函数 $f_1(\lambda)$ 可简化为：

$$f_1(\lambda) = \frac{B'_i - A'_i \lambda}{A''_i \lambda + B''_i}, \quad \frac{A'_i}{A''_i} = \frac{Z_s}{Z_{km}}$$

根据初值条件 $f_1(0)=1$ 、 $f_1(1)=\infty$ ，可得出 $B'_i = B''_i$ 、 $A'_i = -B''_i$ ，再结合 $A'_i = \frac{Z_s}{Z_{km}} A''_i$ ，

$$\text{有 } f_1(\lambda) = \frac{B''_i + (Z_s / Z_{km}) B''_i \lambda}{-B''_i \lambda + B''_i}, \quad B'' \neq 0, \text{ 故有: } f_1(\lambda) = \frac{1+C\lambda}{1-\lambda} \left(C = \frac{Z_s}{Z_{km}} \right), \text{ 且 } f_1(\lambda)$$

唯一。

附录 C:

$$\begin{cases} p_k = (g_{km} + g_{k0})(e_k^2 + f_k^2) - \\ \quad g_{km}(e_k e_m + f_k f_m) - (e_m f_k - e_k f_m)b_{km} \\ q_k = -(e_k^2 + f_k^2)(b_{km} + b_{k0}) + \\ \quad (e_k e_m + f_k f_m)b_{km} - (e_m f_k - e_k f_m)g_{km} \end{cases}$$

$$\begin{cases} p_k = (g_{km} + g_{k0})(e_m^2 + f_m^2) - \\ \quad g_{km}(e_k e_m + f_k f_m) - (e_k f_m - e_m f_k)b_{km} \\ q_k = -(e_m^2 + f_m^2)(b_{km} + b_{k0}) + \\ \quad (e_k e_m + f_k f_m)b_{km} - (e_k f_m - e_m f_k)g_{km} \end{cases}$$

注意，式中的导纳元素与导纳矩阵中的互导纳元素符号相反，如果开断线路与 PV 节点相连，则相应的元素 q 等于 0。