

超高压电网反时限零序电流保护定值二次型优化方法

王峰¹, 朱佳¹, 焦邵麟¹, 毕兆东²

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广州 510620; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 南京 211102)

摘要: 反时限零序电流保护由于其优越的特性得到越来越广泛的应用, 很多学者提出通过优化的方法对其定值进行整定计算。但是, 目前常用的保护定值优化算法往往存在迭代过程复杂耗时长、结果不稳定问题, 仍存在进一步优化空间。为此, 提出了一种超高压电网反时限零序电流保护定值二次型优化方法。首先建立了反时限零序电流保护定值优化模型, 分析了在时间整定值 T_p 一定的情况下, 动作时间 t 与启动电流 I_p 的关系, 然后进行线性拟合, 将复杂难以优化求解的非线性非凸优化模型转化为一个二次目标二次约束模型。然后基于 MATLAB 软件平台, 采用建模工具 YALMIP 对问题进行建模, 调用优化求解工具 Gurobi 进行求解, 最后以 IEEE 39 节点系统为例验证了所提方法的有效性和优越性。

关键词: 超高压电网; 反时限零序电流保护; 线性拟合; 二次型优化

Quadratic Optimization Method of Inverse-Time Zero-Sequence Overcurrent Relay Settings in Extra-High Voltage Power Grid

WANG Feng^{1,2}, ZHU Jia¹, JIAO Shaolin¹, BI Zhaodong¹

(1. Power Dispatching and Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China; 2. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Because of its superior characteristics, inverse-time zero-sequence overcurrent relays have been put into use in more and more areas. Many scholars propose to set its setting value through optimization method. However, the commonly used protection setting optimization algorithms often suffer from complex and time-consuming iterative processes, as well as unstable results, and there is still room for further optimization. Therefore, a quadratic optimization method of inverse-time zero-sequence overcurrent relay settings in extra-high voltage power grid is proposed. Firstly, the inverse-time zero-sequence overcurrent relay setting optimization model is established. When the time setting value T_p is certain, the relationship between action time t and the starting current I_p is analyzed, and then the linear fitting is carried out to transform the complex nonlinear non-convex optimization model that is difficult to optimize into a quadratic objective quadratic constraint model. Then, based on the MATLAB software platform, the problem is modeled according to the modeling tool YALMIP, and the optimization solving tool Gurobi is used to solve it. Finally, the IEEE 39-bus system is taken as an example to verify that the proposed method is effective and superior.

Key words: extra-high voltage power grid; inverse-time zero-sequence overcurrent relay; linear fitting; quadratic optimization

0 引言

零序电流保护由于其在改善接地保护灵敏性等

方面具有显著的特点被广泛应用在 110 kV 及以上电压等级电网中, 且作为后备保护投入使用^[1-4]。随着我国电网规模不断扩大、电网结构和组成日益复杂, 阶段式定时限零序电流保护的整定日益困难, 反时限零序电流保护由于其优越的特性在越来越多的地区投入使用。

反时限零序电流保护的主要优点有: 1) 与定时限零序电流保护相比, 动作时间与零序电流大小相

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51677073); 中国南方电网有限责任公司科技项目(036000KK52210063(GDKJXM20210094))。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51677073); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (036000KK52210063(GDKJXM20210094)).

关,当零序电流较大时可以迅速切除故障,可以更好地保证保护动作的选择性,在电网运行方式变化时保护的动作时间可以自动配合^[5-8]。2)与反时限电流保护相比,不受负荷电流影响,启动电流取值可以更低,耐受过渡电阻能力更强,可以更好地反映接地故障^[9-10]。因此,研究反时限零序电流保护在电网中的应用具有重要意义。

反时限过流保护在国外很早就开始投入使用,很多学者提出通过优化的方法对其定值进行整定计算,在满足时间整定值 T_p 的范围约束、启动电流 I_p 的范围约束和保护配合关系约束的条件下,通过优化时间整定值 T_p 和启动电流 I_p 的值,使保护的动作时间最短^[11-13]。但是,反时限过流保护定值优化模型是一个复杂的非线性非凸优化模型,难以在可行域内求解得到一组全局最优解。为此,很多学者对此问题进行了深入的研究,目前反时限过流保护定值优化方法主要有以下两类。1)线性优化方法。通常情况下,反时限过流保护定值优化问题的决策变量为每个保护装置的时间整定值 T_p 和启动电流 I_p 。此类方法将启动电流 I_p 设置为固定值,仅优化时间整定值 T_p ,从而将优化模型转化为线性优化模型,通过线性优化的方法进行求解^[14-16]。但是,由于没有对启动电流 I_p 进行优化,故障后保护的動作时间仍有进一步优化的空间。2)群智能优化方法。一些学者将受生物群体行为启发而设计出的具有生物体行为特征的优化算法,如遗传算法^[17-18]、粒子群算法^[19-21]、生物地理学优化算法^[22]、灰狼算法^[23-24]等应用于反时限过流保护定值优化问题中。但是,这类算法通常存在理论基础不够完善、难以保证收敛到全局最优解、迭代过程复杂耗时长、优化结果不稳定等问题。目前反时限零序电流保护在我国的应用尚处于起步阶段,其定值的整定计算主要依赖整定人员的工程经验^[25-28],整定的效率有待提高。

针对上述已有反时限过流保护定值优化求解算法存在的问题,根据我国超高压电网故障后反时限零序电流保护动作时间 t 与时间整定值 T_p 和启动电流 I_p 的关系,本文提出了一种超高压电网反时限零序电流保护定值二次型优化方法。该方法通过线性拟合的方式将复杂难以求解的非线性非凸优化模型转化为了二次目标二次约束模型,并调用优化求解工具 Gurobi 进行二次型优化问题的求解,最后采用 IEEE 39 节点系统进行算例分析,验证所提方法在

定值性能、求解速度和结果稳定性上的优势。本文研究对于在线整定场景和对计算效率要求较高的离线整定场景具有较好的应用价值。

1 反时限零序电流保护定值优化模型

本节基于反时限零序电流保护特性曲线,以时间整定值 T_p 与启动电流 I_p 作为决策变量,以系统可能发生的线路故障情况下故障所在线路的反时限零序电流保护动作时间最短为目标函数,以时间整定值 T_p 和启动电流 I_p 的范围约束、保护配合关系约束为约束条件,建立反时限零序电流保护定值优化模型。

1.1 反时限零序电流保护特性曲线

我国输电网中反时限零序电流保护特性曲线统一采用 IEC 标准反时限特性曲线,如式(1)所示。

$$t(3I_0) = \frac{0.14T_p}{\left(\frac{3I_0}{I_p}\right)^{0.02} - 1} \quad (1)$$

式中: $t(\cdot)$ 为反时限零序电流保护的動作时间; I_0 为发生接地短路故障后流过保护装置的零序电流; T_p 为时间整定值; I_p 为启动电流定值。

1.2 目标函数

反时限零序电流保护定值优化的目标为:在系统所有可能发生的线路故障下,故障所在线路的反时限零序电流保护動作时间最短,目标函数如式(2)所示。

$$\min z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L w_{ijk} \cdot t_{ijk} \quad (2)$$

式中: N 为所有反时限零序电流保护的数量; M 为所有可能发生的接地短路故障类型; L 为所有可能发生的接地短路故障位置; w_{ijk} 为接地短路故障对应的权重; t_{ijk} 为发生接地短路故障时对应的反时限零序电流保护的動作时间。式(2)中的权重可以结合电网的实际情况设定。例如,针对输电主通道、连接有重要电源或者负荷的保护,可以赋予较大的权重;而针对局部输电通道、连接较次要电源或者负荷的保护,可以赋予较小的权重。考虑到保护定值整定计算中一般以金属性简单故障为计算依据^[29],因此式(2)中所有可能发生的接地短路故障为金属性接地故障,未包含高阻接地故障。

1.3 约束条件

1.3.1 时间整定值 T_p 的范围约束

时间整定值 T_p 对反时限零序电流保护的動作速

度有显著影响,保护装置在出厂时就已经设置时间整定值 T_p 的取值范围,如式(3)所示。

$$T_{pmin} \leq T_p \leq T_{pmax} \quad (3)$$

式中 T_{pmin} 和 T_{pmax} 分别为时间整定值 T_p 的下限和上限,由保护装置的型号和实际运行需要决定。

1.3.2 启动电流 I_p 的范围约束

在反时限过电流保护整定计算过程中,为保证保护装置在正常情况下不误动,启动电流 I_p 需要躲过线路的最大负荷电流,但是反时限零序电流保护的動作情况不受负荷电流影响。在其整定计算过程中启动电流 I_p 的范围需要满足式(4)所示关系。

$$I_{pmin} \leq I_p \leq I_{pmax} \quad (4)$$

式中 I_{pmin} 和 I_{pmax} 分别为启动电流 I_p 的下限和上限。

为保证反时限零序电流保护不误动, I_p 应躲过正常运行时的最大不平衡电流,即启动电流的整定值下限 I_{pmin} 需满足式(5)所示关系。

$$I_{pmin} \geq I_{omax} \quad (5)$$

式中 I_{omax} 为线路正常运行时的最大不平衡电流。

为保证在各种故障情况下反时限零序电流保护均能可靠动作,且在发生高阻接地故障时有灵敏度,启动电流的整定值上限 I_{pmax} 需满足式(6)所示关系。

$$\begin{cases} I_{pmax} \leq I_{fmin} \\ I_{pmax} \leq 300 \text{ A} \end{cases} \quad (6)$$

式中 I_{fmin} 为本线路及相邻线路发生接地故障时流过本线路的3倍零序电流的最小值。在超高压电网发生短路故障时,通常满足故障电流 $I_f > 300 \text{ A}$,因此,可以仅考虑式(6)的第二个公式,即 $I_{pmax} \leq 300 \text{ A}$ 。

1.3.3 保护配合关系约束

当输电线路发生接地短路故障时,应该由故障线路两端的反时限零序电流保护优先动作,当其不能正常动作时,才由相邻线路的反时限零序电流保护作为后备保护进行动作。为保证保护的选择性,当故障发生时,故障所在线路保护与后备保护的動作时间应该满足式(7)所示关系。

$$t_{ij} - t_i \geq C_{Ti} \quad (7)$$

式中: t_i 和 t_{ij} 分别为故障所在线路保护和相邻线路后备保护的動作时间; C_{Ti} 为保护配合时间间隔。

需要说明的是,根据反时限零序电流保护的特性曲线,零序电流较大时動作时间较短,零序电流

较小时動作时间较长,即相邻的反时限零序电流保护具有天然的时间配合属性。因此,在给定配合约束式(7)下一般都存在最优解。

2 超高压电网反时限零序电流保护二次型优化方法

反时限零序电流保护的定值优化模型是一个复杂的非线性非凸优化模型,难以通过数学方法进行求解,在已有文献中多采用智能优化算法进行优化求解,但这些方法往往存在迭代过程复杂耗时长、优化结果不稳定等问题。因此,本节根据超高压电网故障后反时限零序电流保护動作时间 t 与时间整定值 T_p 和启动电流 I_p 的关系,提出一种保护定值优化求解的新思路。本节分析在时间整定值 T_p 固定的情况下,動作时间 t 与启动电流 I_p 的关系,通过线性拟合的方式将复杂的非线性非凸优化模型简化为二次目标二次约束模型进行求解。

2.1 動作时间与启动电流关系分析

在反时限特性曲线中,当时间整定值 T_p 和故障后3倍零序电流 $3I_0$ 大小一定时,動作时间 t 与启动电流 I_p 之间存在复杂的非线性关系,导致优化问题的求解十分困难。本小节分析不同零序电流大小下,在时间整定值 T_p 大小一定时,動作时间 t 与启动电流 I_p 的关系,结合超高压电网故障后零序电流较大的特点,将動作时间 t 与启动电流 I_p 的关系进行线性化处理。

根据1.3节所述约束条件,假设时间整定值 T_p 取1,启动电流 I_p 的取值范围为 $(0, I_{pmax}]$, I_{pmax} 取300 A,分别给出发生接地短路故障后3倍零序电流 $3I_0$ 为 $1.5I_{pmax}$ 、 $2I_{pmax}$ 、 $3I_{pmax}$ 、 $5I_{pmax}$ 时動作时间与启动电流的关系曲线,如图1所示。

当流过线路的零序电流较小时,如 $K=1.5$ (K 为发生接地短路故障后流过线路的3倍零序电流与启动电流最大值 I_{pmax} 的比值),根据反时限零序电流保护的特性曲线,电流越小,動作时间越长,大约为10~20 s。随着流过线路的零序电流增加,如 $K=3$,動作时间逐渐减小,大约在5 s左右。

而且,根据图1可知,随着零序电流 $3I_0$ 增大,当启动电流 I_p 位于(100 A, 300 A)区间时,動作时间 t 与启动电流 I_p 表现出越来越明显的线性关系。此时,可以用直线拟合動作时间 t 与启动电流 I_p 之间的关系。

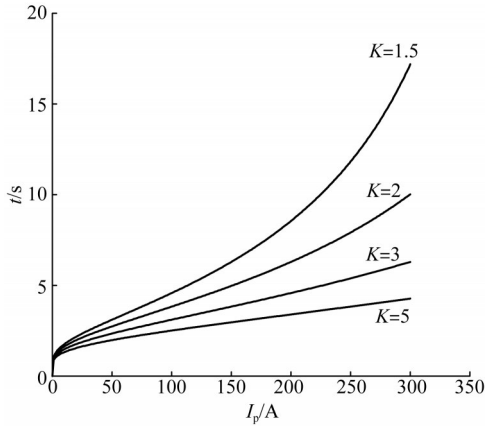


图 1 $3I_0=KI_{pmax}$ 时动作时间与启动电流的关系曲线

Fig. 1 Relation curves between action time and starting current when $3I_0=KI_{pmax}$

2.2 反时限零序电流保护二次型优化模型

2.2.1 故障线路两端保护的二次型模型

当超高压电网中输电线路发生接地短路故障时, 流过故障线路两端保护的 3 倍零序电流通常远大于 300 A, 根据前述 2.1 节分析, 在时间整定值 T_p 大小一定时, 动作时间 t 与启动电流 I_p 之间的关系可近似视为线性关系, 可以通过最小二乘法拟合二者之间的关系, 具体步骤如下。

1) 已知发生接地短路故障后流过保护的 3 倍零序电流为 $3I_0$, 将启动电流 I_p 作为自变量, 动作时间 t 作为因变量。在 $[I_{pmin}, I_{pmax}]$ 区间内, 以 h 为间隔均匀取值, 得到 n 个电流数值, 假设第 i 个电流为 I_{pi} , 根据式(1)计算每个 I_{pi} 对应的 t_i , 从而得到 n 组 (I_{pi}, t_i) 值, 分别计算 I_{pi} 的平均值 $\bar{I}_p$ 和 t_i 的平均值 $\bar{t}$ 。

2) 根据最小二乘法计算拟合直线的斜率 a_1 , 其表达式如式(8)所示。

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n I_{pi} \cdot t_i - n \bar{I}_p \cdot \bar{t}}{\sum_{i=1}^n I_{pi}^2 - n \bar{I}_p^2} \quad (8)$$

3) 根据 $\bar{I}_p$ 、 $\bar{t}$ 和计算得到的斜率 a_1 , 通过式(9)计算截距 b_1 。

$$b_1 = \bar{t} - a_1 \bar{I}_p \quad (9)$$

4) 得到如式(10)所示的线性拟合关系式。

$$t = a_1 I_p + b_1 \quad (10)$$

5) 根据式(1), 最终动作时间 t 与时间整定值 T_p 呈线性关系, 即可得到故障线路两端保护动作时间 t 与时间整定值 T_p 、启动电流 I_p 之间的关系式, 如式(11)所示。

$$t = T_p \cdot (a \cdot I_p + b) \quad (11)$$

式中 a 、 b 分别为动作时间 t 与启动电流 I_p 之间线性拟合关系式中的斜率和截距。

2.2.2 故障线路相邻线路后备保护的二次型模型

当超高压电网中输电线路发生接地短路故障时, 由于保护配合时零序分支系数大小不同, 流过故障线路相邻线路后备保护的零序电流大小也不同, 此时可根据流过后备保护的 3 倍零序电流 $3I_0$ 是否大于 $3I_{pmax}$ 分两种情况构建模型。

如果 $3I_{j0} \geq 3I_{pmax}$ (I_{j0} 为流过故障线路相邻线路的零序电流), 根据前述分析, 当时间整定值 T_p 一定时, 动作时间 t 与启动电流 I_p 之间具有明显的线性关系, 后备保护动作时间 t 与时间整定值 T_p 、启动电流 I_p 之间的关系可以用式(11)表示。

如果 $3I_{j0} < 3I_{pmax}$, 由于在 (I_{pmin}, I_{pmax}) 区间内动作时间 t 与启动电流 I_p 正相关, 启动电流 I_p 越大, 动作时间 t 越大。因此若 I_p 取 I_{pmin} 时其对应的动作时间满足约束条件式(7), 则 I_p 在取值范围内对应的动作时间均可满足约束条件式(7)。

综合以上分析, 故障线路相邻线路后备保护的動作时间特性可以简化为式(12)。

$$t = \begin{cases} T_p \cdot (a \cdot I_p + b), & 3I_{j0} \geq 3I_{pmax} \\ T_p \cdot \frac{0.14}{(3I_{j0}/I_{pmin})^{0.02} - 1}, & 3I_{j0} < 3I_{pmax} \end{cases} \quad (12)$$

在式(12)中, 对于启动电流较大的线路, 则采用直线拟合动作时间和启动电流的关系; 对于启动电流较小的线路, 则仍然采用保护的動作特性曲线, 即式(1), 计算保护的動作时间。

2.3 二次型模型优化求解

根据前述分析可以得到线路故障后故障所在线路保护和后备保护的動作时间 t 与时间整定值 T_p 和启动电流 I_p 的关系如式(11)和式(12)所示, 将其代入目标函数式(2)与约束条件式(7), 可得到反时限零序电流保护的二次型优化模型为二次目标二次约束模型, 基本形式如式(13)所示。

$$\begin{cases} \min & \mathbf{x}^T \mathbf{Q}_0 \mathbf{x} + \mathbf{a}_0^T \mathbf{x} \\ \text{s.t.} & \mathbf{x}^T \mathbf{Q}_i \mathbf{x} + \mathbf{a}_i^T \mathbf{x} \leq b_i \\ & \mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\mathbf{x}$ 为所有保护时间整定值 T_p 和启动电流 I_p 组成的列向量; $\mathbf{Q}_0$ 和 $\mathbf{a}_0$ 分别为将式(11)代入式(2)时, 保护时间整定值 T_p 和启动电流 I_p 相乘项对应的系数矩阵和启动电流项对应的系数列向量; $\mathbf{Q}_i$ 、 $\mathbf{a}_i$ 和 b_i

分别为将式(11)代入式(7)时,保护时间整定值 T_p 和启动电流 I_p 相乘项对应的系数矩阵、启动电流项对应的系数列向量、常数项对应的系数列相量; $\mathbf{l}$ 和 $\mathbf{u}$ 分别为 $\mathbf{x}$ 的上下限约束列向量。

通常情况下,二次目标二次约束的优化问题是一个非凸的NP难问题,Gurobi在解决二次目标二次约束非凸优化模型上表现出了优异的性能。因此,本文基于MATLAB软件平台,采用建模工具YALMIP对问题进行建模,最后调用优化求解工具Gurobi进行求解。

3 算例分析

3.1 算例系统概况

本文算例采用IEEE 39节点系统,该系统共包含10台发电机、12个变压器支路和34条线路。节点和支路参数采用IEEE 39节点系统标准参数。假设所有线路两端均配置了反时限零序电流保护,保护所在位置及编号如图2所示。由于34条线路两端的68个保护都需要整定时间整定值 T_p 和启动电流 I_p ,因此决策变量为一组136维的向量。故障类型考虑单相短路接地和两相短路接地,故障位置考虑线路首端故障和末端故障,设各短路故障对应的权重 w_{ijk} 均为1。约束条件中 T_p 的下限 T_{pmin} 取0.05 s,上限 T_{pmax} 取1 s, I_p 的下限 I_{pmin} 取150 A,上限 I_{pmax} 取300 A,保护配合时间间隔 C_{Ti} 取0.1 s。考虑到零序反时限电流保护常常作为接地距离保护的补充,用于切除高阻接地故障^[29]。因此,在确定保护定值时

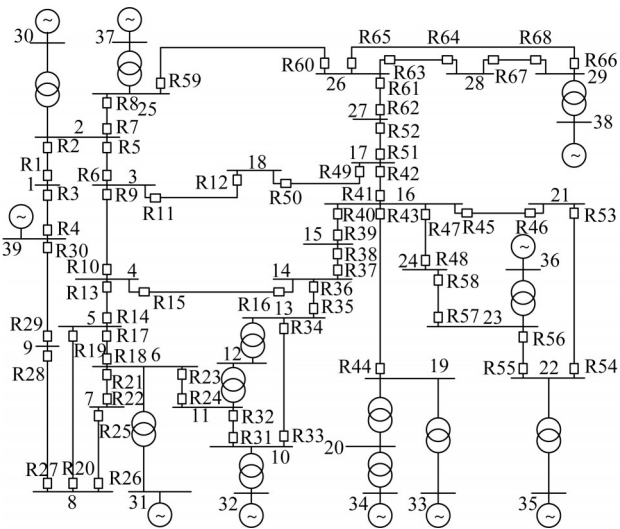


图2 IEEE 39节点系统

Fig. 2 IEEE 39-bus system

将时间间隔设置的较小,以提高高阻故障时保护动作的快速性。在MATLAB中采用YALMIP对问题进行建模。

3.2 算例结果分析

调用Gurobi对模型求解,得到各保护时间整定值 T_p 和启动电流 I_p 的最优取值,结果如表1所示。

以线路3-4的首端(母线3侧)发生单相接地短

表1 算例优化结果

Tab. 1 Optimization result of the example

保护编号	T_p/s	I_p/A	保护编号	T_p/s	I_p/A
R1	0.05	150	R35	0.27	195
R2	0.17	150	R36	0.24	150
R3	0.13	150	R37	0.27	150
R4	0.08	150	R38	0.21	150
R5	0.25	182	R39	0.22	150
R6	0.17	150	R40	0.25	300
R7	0.20	300	R41	0.29	180
R8	0.19	288	R42	0.18	156
R9	0.24	150	R43	0.05	150
R10	0.22	150	R44	0.26	187
R11	0.23	159	R45	0.19	198
R12	0.22	150	R46	0.25	150
R13	0.25	150	R47	0.09	300
R14	0.25	196	R48	0.21	150
R15	0.25	163	R49	0.26	168
R16	0.25	161	R50	0.19	150
R17	0.21	150	R51	0.16	172
R18	0.24	300	R52	0.21	150
R19	0.16	249	R53	0.15	150
R20	0.17	150	R54	0.30	150
R21	0.21	300	R55	0.20	300
R22	0.05	150	R56	0.16	150
R23	0.24	300	R57	0.26	150
R24	0.26	150	R58	0.05	150
R25	0.16	300	R59	0.25	150
R26	0.07	150	R60	0.05	150
R27	0.17	150	R61	0.25	163
R28	0.05	150	R62	0.12	150
R29	0.12	150	R63	0.11	150
R30	0.08	150	R64	0.19	150
R31	0.25	300	R65	0.08	150
R32	0.26	151	R66	0.19	150
R33	0.27	300	R67	0.07	150
R34	0.21	150	R68	0.22	150
目标函数/s:117.30				求解时间/s:1.43	

路故障为例, 列出流过其对应的故障所在线路保护和后备保护的 3 倍零序电流及动作时间, 如表 2 所示。

表 2 线路 3-4 故障零序电流及保护动作时间

Tab. 2 Zero-sequence current and action time of relays when a fault happens on line 3-4

保护	保护位置	零序电流 $3I_0/A$	动作时间 t/s
R9	故障所在线路	7 010	0.42
R10	故障所在线路	2 552	0.53
R5	保护 R9 后备保护	4 553	0.53
R12	保护 R9 后备保护	2 457	0.54
R14	保护 R10 后备保护	1 536	0.83
R16	保护 R10 后备保护	1 016	0.93

根据表 2, 保护 R9 近端发生单相接地短路故障时, 故障所在线路保护及上一级线路后备保护动作时间满足 0.1 s 的时间间隔。检验所有线路故障后保护的動作时间, 相邻保护的動作时间均满足 0.1 s 的时间间隔。通过引入和接地距离保护的配合逻辑^[27]可保证金属性故障时优先由接地距离保护动作, 避免时间间隔较小时反时限零序电流保护的无选择性动作。

此外, 本文还检验了所有线路高阻故障后保护的動作时间, 从检验结果来看, 保护的选择性均满足要求, 且保护之间的配合时间级差大于 0.3 s。以线路 8-9 以及 9-39 发生高阻故障为例, 列出了故障所在线路保护和上一级保护的動作时间, 如表 3 所示。从表 3 可以看出, 当线路发生高阻故障时, 保护的选择性满足要求。

表 3 高阻故障下保护动作时间

Tab. 3 Action time of relays under high resistance fault

保护	保护位置	动作时间 t/s
R28	故障所在线路	0.5
R29	故障所在线路	1.2
R30	保护 R28 后备保护	0.8
R27	保护 R29 后备保护	1.7

本文方法采用直线拟合启动电流与动作时间的关系, 将引入一定的误差。从保护配合关系的检验结果可以看出, 该拟合误差对本文算例中保护定值的正确性影响不大。但是, 该拟合误差对保护定值正确性影响的定量分析还需展开进一步研究。

3.3 过渡电阻耐受能力校验

过渡电阻往往会影响保护的性能, 为校验定值优化结果对过渡电阻的耐受能力, 仍以线路 3-4 的首端发生单相接地短路故障为例进行仿真分析, 假设过渡电阻 $R_f=100\ \Omega$, 列出流过其对应的故障所在线路保护和后备保护的 3 倍零序电流及动作时间, 如表 4 所示。

表 4 $R_f=100\ \Omega$ 时零序电流及保护动作时间

Tab. 4 Zero-sequence current and relays action time when $R_f=100\ \Omega$

保护	保护位置	零序电流 $3I_0/A$	动作时间 t/s
R9	故障所在线路	1 430	0.73
R10	故障所在线路	520	1.22
R5	保护 R9 后备保护	929	1.06
R12	保护 R9 后备保护	501	1.26
R14	保护 R10 后备保护	313	3.72
R16	保护 R10 后备保护	207	6.95

对比表 2 和表 4, 可以得到以下结论: 1) 发生经过渡电阻接地的短路故障后保护仍然具有灵敏性, 可以反映保护范围内发生的故障; 2) 由于过渡电阻的存在, 流过保护的零序电流变小, 保护动作时间变长; 3) 在过渡电阻存在的情况下, 故障所在线路保护和后备保护的動作时间仍然满足配合关系, 不会失去选择性。因此, 保护具有较好的耐受过渡电阻的能力。

3.4 算法结果对比分析

基于第 1 节中给出的反时限零序电流保护定值优化模型, 采用不同的优化算法均可以得到满足约束条件、符合整定计算要求的准确定值, 但是不同的优化算法最优解的性能、优化效率、以及优化稳定性都存在较大差异。灰狼算法是一种受到灰狼捕食猎物活动的启发而开发的一种优化算法, 由于其较强的收敛性能、参数少、易实现等优点, 近年来得到了广泛应用。为验证本文所提方法的有效性和优越性, 选取灰狼算法作为群智能算法的代表算法与本文所提的二次型优化方法进行对比。优化求解过程中的决策变量、目标函数、约束条件与 3.1 节所述相同。仿真过程中, 狼群规模均取 50, 最大迭代次数取 1 000。经过多次不同的初始值设置、多次迭代计算, 获得了较好的收敛结果如表 5 所示。

表5 算法结果对比

Tab. 5 Comparison of algorithm results

算法	动作时间/s	求解时间/s	结果稳定性
二次型优化	117.30	1.43	稳定
灰狼算法	130.16	496.57	不稳定

由表5可知,本文所提出的二次型优化方法的求解结果不仅在定值性能方面更加优越,在求解时间和结果稳定性上与灰狼算法相比也有明显优势。通常情况下,群智能优化算法的初始化具有随机性,不同的初始化结果往往导致优化求解的结果不稳定,且求解过程要经历多次迭代过程、耗时较长。需要说明的是,如果继续尝试设置不同的初始值和进行更多次的迭代计算,也可能会得到比本文所提方法较优的求解结果,但是这必定需要更长的求解时间,结果的稳定性也无法保证。此外,由于群智能优化算法有很多参数需要人工确定,这些参数会影响优化的效果,而且确定这些参数会带来额外的工作量。相比而言,本文所提的二次型优化方法求解速度快、优化结果稳定,且避免了引入可调参数而带来的额外的工作量,因此具有较好的应用价值。

在应用场景方面,本文方法的快速性优点使得该方法适用于计算效率要求较高的在线整定场景。而且,随着电网的快速发展,离线整定计算越来越呈现出频度高、时间短、计算量大等特征。在实际工程中,为了给整定计算人员和现场人员留足定值审核、定值下发、现场执行等环节的时间,离线整定计算的快速性需求也日趋迫切。因此,本文所提方法还适用于有一定计算效率要求的离线整定场景。

4 结论

针对现有反时限零序电流保护定值优化方法的不足,本文提出了一种反时限零序电流保护定值二次型优化方法。

1) 在时间整定值 T_p 一定的前提下,将动作时间 t 与启动电流 I_p 之间的关系近似为线性关系,并通过最小二乘法拟合,将反时限零序电流保护定值优化模型转化为一个二次目标二次约束的问题。

2) 基于MATLAB软件平台,采用建模工具YALMIP对问题进行建模,调用优化求解工具Gurobi进行求解,可以较好地求解二次目标二次约

束非凸优化模型。

3) 通过IEEE 39节点系统算例验证了所提方法的优越性和有效性。与以灰狼算法为代表的群智能算法相比,本文所提方法在定值性能、求解时间和结果稳定性上具有明显优势,同时避免了引入可调参数而带来额外的参数确定工作量。

但是,本文所提的二次型优化方法在线性拟合动作时间 t 与启动电流 I_p 的关系时会引入一定误差,该误差对保护定值正确性影响的定量分析以及如何减少该误差,将在后续研究中进一步开展。

参考文献

- [1] 翁汉琨,康涛,郭祎达,等.高压内置变压器涌流对母联零序过流保护的影响及对策[J].南方电网技术,2023,17(3):75-84.
WENG Hanli, KANG Tao, GUO Yida, et al. Influence and countermeasures of inrush current of transformer with built-in high voltage winding on zero sequence overcurrent protection of bus tie circuit-breaker [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(3): 75-84.
- [2] 吴江雄,郑茂然,王欣,等.基于暂态零序导纳值的谐振接地系统单相接地故障选线方法[J].南方电网技术,2024,18(11):59-66.
WU Jiangxiong, ZHENG Maoran, WANG Xin, et al. Single-phase grounding fault line selection method for resonant grounding system based on transient zero-sequence admittance value [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(11): 59-66.
- [3] 郑燃,吴佳毅,杜浩良,等.基于零序电流TEO梯度能量的光伏场站集电线路故障选线方法[J].中国电力,2025,58(2):147-153.
ZHENG Ran, WU Jiayi, DU Haoliang, et al. A new method for fault line selection of photovoltaic power station collection lines based on TEO energy [J]. Electric Power, 2025, 58(2): 147-153.
- [4] 叶远波,王吉文,汪胜和,等.计及故障点两侧零序电流相位差的新能源送出线路接地故障时域距离保护研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(20):180-187.
YE Yuanbo, WANG Jiwen, WANG Shenghe, et al. Time domain distance protection of new energy transmission line grounding fault considering the phase difference of zero sequence current on both sides of the fault point [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 180-187.
- [5] 汪洋,薛永端,徐丙垠,等.小电阻接地系统接地故障反时限零序过电流保护[J].电力系统自动化,2018,42(20):150-157.
WANG Yang, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. Zero-sequence inverse-time overcurrent protection in low resistance grounding system with grounding fault [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 150-157.
- [6] 李欧.引入变速因子的反时限零序电流保护[D].北京:华北电力大学,2015.
- [7] 严琪,肖万芳.反时限电流保护整定计算相关问题研究[J].电力自动化设备,2008(7):77-80.

- YAN Qi, XIAO Wanfang. Setting coordination of inverse-time over-current relays [J]. Electric Power Automation Equipment, 2008(7): 77 – 80.
- [8] 陈朝晖, 漆家炜, 郑茂然, 等. 基于拓扑分群等值的不同拓扑下方向过流保护整定计算方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(4): 81 – 89.
- CHEN Zhaohui, QI Jiawei, ZHENG Maoran, et al. Coordination method of directional overcurrent relays under different topologies based on topology grouping and equivalence [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(4): 81 – 89.
- [9] 赵黎丽, 高昌培, 林虎. 线路和变压器零序反时限保护及其整定配合[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 107 – 110.
- ZHAO Lili, GAO Changpei, LIN Hu. Characteristics and coordination of zero-sequence inverse-time overcurrent protection for transmission line and transformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 107 – 110.
- [10] 高翔. 零序反时限保护应用相关问题研究[J]. 电工技术, 2007(2): 15 – 16.
- GAO Xiang. Research on application of zero-sequence inverse-time relay [J]. Electric Engineering, 2007(2): 15 – 16.
- [11] KALAGE A A, BHUSKADE A. Optimum coordination of directional overcurrent relays using advanced teaching learning based optimization algorithm [C]//2018 IEEE Global Conference on Wireless Computing and Networking (GCWCN), November 23 – 24, 2018, Lonavala, India. New York: IEEE, 2018: 1 – 5.
- [12] ALAEE P, AMRAEE T. Optimal coordination of directional overcurrent relays in meshed active distribution network using imperialistic competition algorithm [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(2): 416 – 422.
- [13] HEBATALLAH M S, HATEM H Z, EHAB E S. Protection coordination for microgrids with grid-connected and islanded capabilities using communication assisted dual setting directional overcurrent relays [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 143 – 151.
- [14] RALHAN S, RAY S. Directional overcurrent relays coordination using linear programming intervals: a comparative analysis [C]// 2013 Annual IEEE India Conference (INDICON), December 13 – 15, 2013, Mumbai, India. New York: IEEE, 2013: 1 – 6.
- [15] URDANETA A J, PEREZ L G, RESTREPO H, et al. Consideration of the transient configurations in the optimal coordination problem of directional overcurrent relays [C]// First IEEE International Caracas Conference on Devices, December 12 – 14, 1995, Caracas, Venezuela. New York: IEEE, 1995: 1 – 4.
- [16] DAWOOD R, ALGREER M, GAILANI A, et al. Optimum time coordination of directional overcurrent relays using CVX, GAMS and genetic algorithm [C]//10th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, December 15 – 17, 2020, Online Conference, UK. London: Institution of Engineering and Technology, 2020: 50 – 55.
- [17] CHAKOR S V, DATE T N. Optimum coordination of directional overcurrent relay in presence of distributed generation using genetic algorithm [C]//2016 10th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO), January 7 – 8, 2016, Coimbatore, India. New York: IEEE, 2016: 1 – 5.
- [18] ALKARAN D S, VATANI M R, SANJARI M J, et al. Optimal overcurrent relay coordination in interconnected networks by using fuzzy-based GA method [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3091 – 3101.
- [19] AN L, YANG M T. Optimal coordination of directional overcurrent relays using NM-PSO technique [C]// 2012 International Symposium on Computer, Consumer and Control, June 4 – 6, 2012, Taichung, Taiwan, China. New York: IEEE, 2012: 678 – 681.
- [20] DAMCHI Y, MASHHADI H R, SADEH J, et al. Optimal coordination of directional overcurrent relays in a microgrid system using a hybrid particle swarm optimization [C]// International Conference on Advanced Power System Automation & Protection, October 16 – 20, 2011, Beijing, China. New York: IEEE, 2011: 1135 – 1138.
- [21] 郭蕊. 基于改进粒子群算法的反时限过电流保护定值优化研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- [22] ALBASRI F, ALROOMI A R, TALAQ J H. Optimal coordination of directional overcurrent relays using biogeography-based optimization algorithms [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 1810 – 1820.
- [23] 易江. 考虑多拓扑结构的微网反时限过流保护定值优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [24] 何思名, 袁智勇, 雷金勇, 等. 基于改进灰狼算法的DG接入配电网反时限过电流保护定值优化[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 173 – 181.
- HE Siming, YUAN Zhiyong, LEI Jinyong, et al. Optimal setting method of inverse time over-current protection for a distribution network based on the improved grey wolf optimization [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 173 – 181.
- [25] 孙正伟, 刘家庆, 鲍斌, 等. 超高压电网反时限零序过流保护简化整定方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 18 – 26.
- SUN Zhengwei, LIU Jiaqing, BAO bin, et al. A novel simplified relay coordination method for inverse-time zero-sequence overcurrent relays applied in an extra-high voltage power grid [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 18 – 26.
- [26] 黄景光, 李浙栋, 张宇鹏, 等. 计及后备保护优化级数的改进阻抗修正反时限过流保护整定方法[J]. 电网技术, 2022, 46(7): 2768 – 2777.
- HUANG Jingguang, LI Zhedong, ZHANG Yupeng, et al. Setting optimization of improved impedance correction inverse time overcurrent protection considering backup protection optimization series [J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2768 – 2777.
- [27] 刘阳, 陈祥文, 王玉龙, 等. 超、特高压交流线路反时限零序过流后备保护的整定建议[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(1): 217 – 224.
- LIU Yang, CHEN Xiangwen, WANG Yulong, et al. Setting suggestions of inverse-time zero-sequence overcurrent backup protection for EHV and UHV AC lines [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(1): 217 – 224.
- [28] 吴梓亮, 李一泉, 陈桥平, 等. 一种基于正序阻抗的输电线路接地距离保护参数整定方法[J]. 南方电网技术, 2020, 14(10): 96 – 102.
- WU Ziliang, LI Yiquan, CHEN Qiaoping, et al. A parameter setting method of grounding distance protection for transmission line based on positive sequence impedance [J]. Southern

Power System Technology, 2020, 14(10): 96 – 102.

- [29] 国家能源局. 220 kV ~ 750 kV 电网继电保护装置运行整定规程: DL/T 559—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018.

收稿日期: 2023-09-24; 网络首发日期: 2024-05-20

作者简介:

王峰(1982), 女, 高级工程师(教授级), 硕士, 研究方向为电力系统继电保护, 15153768@qq.com;

朱佳(1990), 女, 高级工程师, 博士, 研究方向为电力系统继电保护整定与校核, zhujiaceee@qq.com;

焦邵麟(1977), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力系统故障分析与继电保护, 2391448346@qq.com。

(上接第 101 页 Continued from Page 101)

ZHENG Tao, ZOU Pengying, WANG Ziming. Analytical calculation of fault current for photovoltaic grid-connected system considering dynamic response characteristics of phase-locked loop [J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4656 – 4667.

- [20] 谭会征, 李永丽, 陈晓龙, 等. 带低电压穿越特性的逆变型分布式电源对配电网短路电流的影响[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 31 – 37, 52.

TAN Huizheng, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. Impact of inverter-based distributed generation with low voltage ride-through capability on short-circuit current in distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 31 – 37, 52.

- [21] CAMACHO A, CASTILLA M, MIRET J, et al. Reactive power control for distributed generation power plants to comply with voltage limits during grid faults [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 6224 – 6234.

- [22] MOALLEM A, YAZDANI D, BAKHSHAI A, et al. Frequency domain identification of the utility grid parameters for distributed power generation systems [C]// Applied Power Electronics Conference & Exposition, March 6 – 11, 2011, Fort Worth, TX, New York: IEEE, 2011: 361 – 374.

- [23] 刘翼飞, 崔承刚. 基于地基云图云量特征的光伏发电功率区间预测[J]. 南方电网技术, 2023, 17(2): 92 – 100.

LIU Yifei, CUI Chenggang. Interval prediction for short-term

solar power based on cloud features of ground-based cloud images [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(2): 92 – 100.

- [24] KATHIRESAN A C, PANDIARAJAN J, SIVAPRAKASH A, et al. An adaptive feed-forward phase locked loop for grid synchronization of renewable energy systems under wide frequency deviations [J]. Sustainability, 2020, 12(17): 7048.

- [25] 赵贵龙, 曹玲玲, 祝龙记. 基于光伏并网逆变系统的改进锁相环设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 108 – 112. ZHAO Guilong, CAO Lingling, ZHU Longji. Improved phase-locked loop design based on photovoltaic grid-connected inverter system [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 108 – 112.

- [26] CHUNG Se-Kyo. A phase tracking system for three phase utility interface inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(3): 431 – 438.

收稿日期: 2023-09-15; 网络首发日期: 2024-05-14

作者简介:

李世伟(1988), 男, 工程师, 高级技师, 学士, 研究方向为电力系统继电保护检修;

毕书奇(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障分析, bishuqi@cqu.edu.cn;

欧阳金鑫(1984), 男, 通信作者, 副教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为电力系统保护与控制、新能源并网, jinxinoy@163.com。

征 稿 启 事

《南方电网技术》是由中国南方电网公司主管、南方电网科学研究院有限责任公司主办的电力技术类科技期刊,向国内外公开发行人。刊登电力系统的科研、规划、设计、工程、生产运行、设备和系统维护等方面的成果、经验和动态,尤其是科研创新方面的论文。设有特约专稿、高压直流输电、高电压与绝缘、系统分析与运行、控制与保护、调度与通信、输变电技术、电力技术经济、智能电网、分布式电源与微电网、低碳电力等栏目。热烈欢迎国内外的电力研究人员、工程技术人员、大专院校师生踊跃投稿。

1 文稿要求

1) 文稿应未在其他刊物上发表过,译文稿件须附上原作者的书面许可证明。内容要有科学性、创新性和实用性;论点明确、数据可靠、说理严谨、数学推导简明;语言流畅、文字简练、层次分明、重点突出。

2) 学术论文请按 GB 7713—1987《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》书写,篇幅以版面不超过 9 000 字(包括图表所占篇幅)为宜。同时请写明如下 a、b、c、d、e 五项:

a) 作者署名(不宜超过 7 位)、作者单位、地址、电话、email 信箱和邮政编码;

b) 论文题目和作者单位英译文,作者姓名的汉语拼音;

c) 作者的简历,包括姓名、出生年、性别、籍贯、职称、学位、当前从事的研究或工作等项;

d) 350 字左右的中文摘要,3~8 个关键词,以及摘要和关键词相应的英文文本。摘要采用第三人称写法,内容包括论文的目的、方法、结果和结论;

e) 若为国家基金资助项目或部、省级重大科研攻关项目,需提供项目名称及编号。

2 书写格式

1) 要求文稿正文字号为 5 号,汉字字体为宋体,英数字体为 Times New Roman,希腊字体为 Symbol。文稿须采用可编辑的电子文档形式。

2) 计量单位采用国家法定计量单位和符号,不能用“大气压”、“kgf/cm²”、“卡”、“ppm”等已废除的计量单位。

3) 文中和公式中容易混淆的字符请注明文种(希文、英文、罗马字等)、大小写、上下标及上下标字母含义,表示矢量及矩阵的字符用黑斜体表示或特别注明。

4) 文稿标题中不宜用缩略词(化学符号和公知公用者除外);摘要和正文中的缩略词在第一次出现时必须写出全称,后加括号附缩略词。

3 表格、插图及参考文献

1) 表格尽量采用“三线表”。表格的上方写表序和表名。表名应有自明性且中文、英文表名并列。表注放在表底,缩入 1 个汉字以“注:”起头排版。

2) 插图的下放应有图序和图名。图名应有自明性且中英文图名并列。工程图、电气图和函数图采用 AutoCAD、

Adobe Illustrator 或 Corel DRAW 软件绘制,工程图和电气图要符合国家标准规定,函数图要标明曲线序号及其注释,坐标轴上要有标值、标目,注明物理量和单位;数码照片图具备 200 万总像素以上。

3) 图片和表格中的文字、变量、单位和数字要齐全、清晰。

4) 参考文献应选用公开发表的资料,按引用的先后次序列表于文后,以[1]、[2]…标识序号,且与正文中的指示序号一致。按《信息与文献 参考文献著录规则,GB/T 7714—2015》和《中国学术期刊(光盘版)检索与评价数据规范,CAJ-CD B/T 1—2006 修订版试行稿》的要求著录文后参考文献。中文参考文献后要并列其英文译文(如示例[6]所示)。

文献类型及其标识为:普通图书[M];会议论文[C];报纸文章[N];期刊文章[J];学位论文[D];报告[R];标准[S];专利[P];汇编[G];档案[B];古籍[O];参考工具[K];其他未说明的文献类型,例如可公开的政府行政部门编号文件、行业或大公司的技术规范或工作手册[Z]。网上期刊[J/OL];网上电子公告[EB/OL]。电子文献尚需在载体标记后加上发表或更新日期(加圆括号)、引用日期(加方括号)和电子文献网址。

4 投稿

1) 请登录《南方电网技术》编辑部网站 <https://nfdwjs.csg.cn>,选择“作者登录”,登录或注册登录后选择投稿并按提示操作,登录方面出现问题请致电 020-36625646 咨询。

2) 投稿时务必附上联系电话(手机为佳)。

3) 编辑部不保证留存稿件,请作者自留底稿。稿件评审进程和结论可在《南方电网技术》编辑部网站上即时查询。作者也可致电 020-36625642、36625643 或发送电子邮件到 nfdwjs@csg.cn 向编辑部了解审稿情况。

4) 文章一经发表,编辑部便取得作者的自动授权,可将文章收录入本刊网站,及与本刊有合作关系的数据库。

参考文献著录格式示例:

- [1] 刘国钧,陈绍业,王凤翥. 图书馆目录[M]. 北京:高等教育出版社,1957:15-18.
- [2] 钟文发. 非线性规划在可燃毒物配置中的应用[C]//赵玮. 运筹学的理论与应用——中国运筹学会第五届大会论文集. 西安:西安电子科技大学出版社,1996:468-471.
- [3] 冯西桥. 核反应堆压力管道与压力容器的 LBB 分析[R]. 北京:清华大学核能技术设计研究院,1997.
- [4] 中国国家标准化管理委员会. 信息与文献 参考文献著录规则:GB/T 7714—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [5] 邓一刚. 全智能节电器:200610171314.3[P]. 2006-12-13.
- [6] 陈祥. 无线技术在现代电网管理中的应用与展望[J]. 南方电网技术,2009,3(6):85-89.
CHEN Xiang. Development of wireless technology in modern power grid management and its perspective [J]. Southern Power System Technology, 2009,3(6):85-89.
- [7] 王明亮. 关于中国学术期刊标准化数据库系统工程的进展[EB/OL]. (1998-08-16) [1998-10-04]. <http://www.cajcd.edu.cn/pub/wml.txt/980810-2.html>.

《南方电网技术》编辑部