

基于 WAMS 的继电保护静态特性监视及其隐藏故障诊断

熊小伏, 刘晓放

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆市 400030)

摘要: 继电保护系统的隐藏故障对电网的运行威胁很大, 而隐藏故障的在线诊断十分困难。文中提出利用广域测量系统(WAMS)的测量计算值与继电保护装置的测量计算结果二者的差异, 对继电保护装置静态特性进行实时监测, 从而发现其隐藏故障, 并建立了相应的判据。以输电线路光纤纵差保护为例, 分析了隐藏故障判据门槛值的整定计算方法。

关键词: 静态特性; 隐藏故障; WAMS; 状态监视; 继电保护系统

中图分类号: TM774; TM732

0 引言

继电保护装置作为电网安全稳定的第一道防线起着十分重要的作用。继电保护装置可能存在的隐藏故障对连锁反应事故扩大起着推波助澜的作用^[1-5], 其直接后果是导致被保护元件的错误断开^[6]。为了提高互联系统的运行可靠性, 有必要研究如何实现继电保护系统中隐藏故障的检测与监视。

早在 1996 年就有专家提出了对继电保护隐藏故障进行监视和控制的设想^[7], 但因当时的条件所限而未能深入研究。近几年来, 相关的研究因技术的进步而有所发展, 通过利用线路相关集、故障树、模糊推理以及连续故障搜索模型等方法^[8-9], 可建立隐藏故障与系统连锁故障的关系, 但不能找出继电保护系统中的隐藏故障并进行消除。现有的在线检测研究大多着眼于继电保护装置的硬件冗余措施以及定值的在线校核^[10-11], 也有学者提出在继电保护系统中增加数字设备、建立监控系统进行监视的方法, 此外无更深入的研究与应用。

近年来, 继电保护信息系统的建设正在快速进行, 继电保护装置的信息有望快速上传和共享。此外, 国内外电力系统正在构建旨在实现电网动态稳定实时监控的广域测量系统(WAMS), WAMS 的建立提供了又一新的信息集成平台。所有这些信息的集成, 将为继电保护隐藏故障的诊断提供可用的信息源。

为此, 本文提出将继电保护隐藏故障监视功能融入继电保护信息系统, 并以 WAMS 和继电保护

装置信息为诊断输入进行继电保护系统隐藏故障诊断的新方法。由于扩展了信息来源, 继电保护的工作状况特别是测量回路的隐藏故障诊断将变得可行。本文首先分析了继电保护系统的工作行为, 提出了利用继电保护装置之外的参考信息进行测量回路隐藏故障诊断的判据, 并建立了用 WAMS 实现输电线路光纤差动保护隐藏故障监视的判据, 分析了判据整定门槛的计算方法。

1 继电保护工作特性与隐藏故障检测

1.1 继电保护特性分类

从继电保护动作机理的角度出发, 可将继电保护的特性划分如下:

1) 静态特性

继电保护装置在未满足启动条件时, 仅进行测量计算而不进入逻辑比较和跳闸出口环节。此时存在于电流互感器测量回路、连接电缆及连接端子、继电保护前置处理电路、采样及采样值计算等环节的隐藏故障可能并不能表现出来, 也不一定会造成继电保护装置误动作, 但当一次电流增大或保护区外故障时, 此类隐藏故障将被激活, 导致继电保护误动或拒动。因此, 保证继电保护装置静态特性正确、发现此类隐藏故障是避免出现保护误动和拒动的关键。而确保继电保护测量回路和测量计算正确与否则是静态特性好坏的关键。

2) 动态特性

当继电保护装置的测量信号满足启动条件后, 继电保护装置将进行保护逻辑比较。此时继电保护正确工作的关键是整定值和动作原理的正确。当一次系统扰动结束后, 可根据继电保护装置在扰动过程中的行为记录分析继电保护的动态特性是否正确。相对于静态特性的监视, 如何对继电保护装置

收稿日期: 2008-09-16; 修回日期: 2009-02-10。

国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2004CB217908); 国家自然科学基金资助项目(50777068)。

的动态特性进行在线分析是另一值得研究的重要内容。

1.2 基于 WAMS 的继电保护静态特性隐藏故障诊断方法

隐藏故障存在于继电保护各环节的特点决定了应针对各阶段的隐藏故障模式研究相应的检测方法。本文首先研究继电保护装置静态特性隐藏故障的监视,实现对测量环节隐藏故障的在线检测与诊断。

通常,继电保护装置采集模拟量、开关量作为其动作的输入。对开关量采集环节的监视可通过装置自身的硬件来实现,而对模拟量采集(测量值)回路的监视则难以实现。

继电保护装置的测量回路包括电流互感器、连接电缆、端子、继电保护装置内部的前置变送器、滤波电路、A/D 转换器及中央处理器(CPU)、存储器等多个环节。任一环节的失效或误差增大,均将导致测量值不准。对继电保护静态特性的监视最重要的是监视其测量值的准确性是否发生变化。

若能获得另外 1 个或多个测量元件的测量计算值作为参考量,将继电保护装置的测量计算值与其进行比较,所得结果(包括幅值和相位)应该基本相同。若二者误差超过预先设定的门限值,则认为继电保护装置的静态特性出现了隐藏故障。

要按上述原理实现隐藏故障的检测,作为参考基准的测量元件必须满足高精度和实时性等要求。传统的数据采集与监控(SCADA)系统、能量管理系统(EMS)等的测量数据是标量而非相量,且测量时刻的记录精度不够,无法与继电保护装置的测量值进行实时对比。基于同步相量测量单元(PMU)的 WAMS 基于同步相量测量及现代通信技术,可以在统一参考时间框架下测量电网各处的电流、电压相量^[12],这些带有精确时标的电流、电压相量测量数据具有同步性、实时性、高速度、高精度和高可靠性等特点,可以作为参考基准。

图 1 是输电线路装设继电保护装置 P1, P2 和 PMU 的示意图。

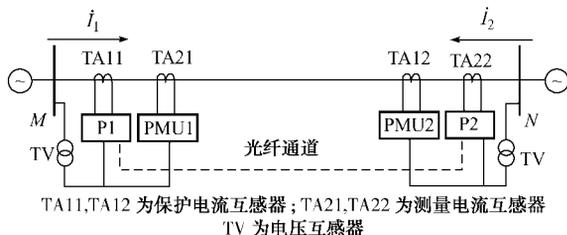


图 1 继电保护装置与 PMU 信号采集

Fig.1 Signal sampling of relay protection and PMU

按照上述方法建立的继电保护静态特性监视系统的结构如图 2 所示。在变电站内,继电保护信息子站与各 PMU 及继电保护装置之间通过高速通信网相连,收集本变电站内继电保护装置和 PMU 的测量数据,可实现站内保护设备的隐藏故障诊断,但不能实现站间继电保护设备的诊断;通过继电保护信息主站和 WAMS 主站,可同时收集电网内不同地点保护装置的测量信息和当地的 PMU 测量信息,因此可实现对多端信息继电保护系统的隐藏故障诊断。

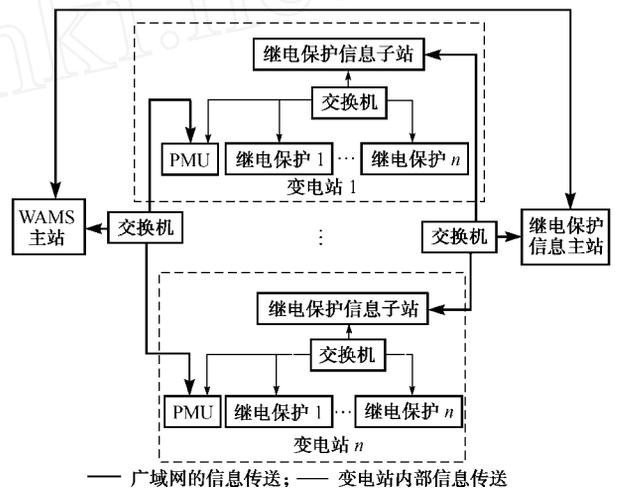


图 2 隐藏故障监视系统结构

Fig.2 Structure of hidden failures monitoring system

以 X_i 代表同一时刻的第 i 个参与比较的测量值,包括继电保护装置测量值和作为参考基准值的 PMU 测量值(例如某输电线路的保护 A 相电流、PMU 的 A 相电流)。 $i = 1, 2, \dots, n$; n 为参与比较的测量值数量。在高压电网保护中,同一地点通常配置了多套继电保护,因此 n 等于继电保护装置的数量加 PMU 的数量。

以对保护装置多个测量通道中的 1 个测量通道进行故障诊断为例,可按以下步骤进行:

- 1) 求本组 PMU 及保护测量值的均值:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1)$$

- 2) 计算各测量值对均值的差值:

$$d_i = X_i - \bar{X} \quad (2)$$

- 3) 找出 d_i 中绝对值最大者 d_j :

$$d_j = \max |d_i| \quad 1 \leq i \leq n \quad (3)$$

- 4) 找出 d_j 对应的采样值 X_j , 计算不包括 X_j 的测量值均值:

$$\bar{X}' = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1, i \neq j}^n X_i \quad (4)$$

- 5) 设 z_d 为隐藏故障报警门限值,当连续多组

采样值均满足下式:

$$\frac{|X_j - \frac{I}{I_m}|}{|\frac{I}{I_m}|} > z_d \quad (5)$$

则可确定第 j 个测量值所对应的保护装置或 PMU 测量回路异常。

目前,要实现本文所提出的功能,尚须解决继电保护装置的信息开放性问题。由于现有部分继电保护装置在未启动的情况下不会向外送出任何信息,这就意味着在系统没有故障或扰动时,继电保护信息主站无法对继电保护装置进行监视。为此,应由生产厂家对继电保护装置的软件进行改进,使装置能将测量计算值及时上传至继电保护信息主站。

2 利用 WAMS 实现双端信息原理保护静态特性监视举例

2.1 光纤纵差保护隐藏故障检测

双端信息原理保护具有原理简单、选择性好、运行可靠性高等特点,在电网中得到了广泛的应用,研究其静态特性的监视方法具有重要意义。本节以光纤纵差保护为例讨论双端信息原理保护静态特性隐藏故障检测中的有关问题。

在图 1 所示的线路上配置一套光纤纵差保护装置(P1, P2),线路两侧各装设一套 PMU,即 PMU1 和 PMU2,通过继电保护信息采集系统获得光纤差动保护的各相电流以及 PMU 的各相电流。以 A 相电流诊断为例,在继电保护信息主站对 PMU 与光纤纵差保护装置中采集的两侧 A 相电流差进行比较,如果检测到二者的差值超过了门槛值 I_{zd} ,则可初步判断光纤纵差保护装置中可能存在隐藏故障,需进一步检查以及时消除设备缺陷。这种方式不仅监视了保护装置测量回路的正确性,还包含了对光纤通道完好性的监视,计算量小,实现方便。

设两端 PMU 的 A 相测量值的差为:

$$I_{PMUA} = I_{PMU1A} - I_{PMU2A} \quad (6)$$

在继电保护信息主站采集线路两侧光纤差动保护装置的 A 相差电流计算结果 I_{P1A} 和 I_{P2A} ,则保护装置静态特性存在隐藏故障的判据为:

$$\frac{|I_{PkA} - I_{PMUA}|}{|I_{PMUA}|} > z_d \quad k = 1, 2 \quad (7)$$

变换式(7)得:

$$|I_{PkA} - I_{PMUA}| > |I_{PMUA}| z_d \quad (8)$$

设继电保护信息主站报警差电流门槛值为

$I_{zd} = |I_{PMUA}| z_d$,可将式(7)的判据变换为:

$$|I_{PkA} - I_{PMUA}| > I_{zd} \quad (9)$$

一旦发现某侧保护装置的计算值与 PMU 的计算值之差超过门槛值,继电保护信息主站即可发出

该套装置可能存在隐藏故障的信号。

门槛值主要与保护装置和 PMU 的测量回路固有误差有关,应该进行深入分析。测量回路固有误差主要受电流幅值测量误差和装置采样不同步的影响。为了便于分析,不考虑这 2 个因素之间的相互作用。

2.2 电流幅值测量误差与 I_{zd} 的关系

在线路无故障时,无论是差动保护还是通过 PMU 计算,两侧电流的差值理论上应为 0。但由于电流幅值测量误差的存在,其值实际不为 0。

电流幅值测量误差的主要来源有:电流互感器测量误差、PMU 测量误差、继电保护装置测量误差。

以 I 表示参考电流差流与继电保护装置差流之间的差值,则有:

$$I = |I_P - I_{PMU}| = |(I_{P1} - I_{P2}) - (I_{PMU1} - I_{PMU2})| \quad (10)$$

以 x 和 y 分别表示装置 x 和 y 的相对测量误差,根据误差运算公式 $x \pm y = x + y$,可得电流差值的误差为:

$$I = P_1 + T_{AP1} + P_2 + T_{AP2} + PMU_1 + T_{AM1} + PMU_2 + T_{AM2} \quad (11)$$

式中: PMU 为 PMU 误差; T_{AM} 为 PMU 所接电流互感器误差; P 为继电保护装置误差; T_{AP} 为保护电流互感器误差。

考虑最不利情况下线路各端相同设备的误差进行叠加,即误差大小相同、符号相反,则式(11)可简化为:

$$I = 2(P_{PMU} + T_{AM} + P + T_{AP}) \quad (12)$$

设线路二次电流的准确值为 I ,得 I_{zd} 与电流幅值测量误差的关系为:

$$I_{zd} = 2I(P_{PMU} + T_{AM} + P + T_{AP}) \quad (13)$$

2.3 采样同步性与 I_{zd} 的关系

由于线路各端 PMU 和继电保护的电流采样是分开独立进行的,各端电流数据的采样必须同步进行才能保证正常时差流值最小,从而保证隐藏故障检测的灵敏度。同步包括了 PMU 之间的同步、继电保护装置之间的同步和 PMU 与继电保护装置的同步 3 个方面。

设线路两侧 PMU 的电流采样值分别为:

$$I_{PMU1} = I_m \cos(2ft + \alpha) \quad (14)$$

$$I_{PMU2} = I_m \cos(2ft + \alpha + \beta + \gamma_{PMU}) \quad (15)$$

式中: I_m 为电流幅值; f 为系统频率; α 为电流初相角; β 为线路两侧的电角差; γ_{PMU} 为两侧 PMU 因采样不同步所带来的相角差。

对于 β 的大小,应该综合考虑以下因素:电流互

传感器的角误差,最大按 7° 考虑; PMU 装置的角误差,取为 1° ; 线路两侧一次电流的相位差,最大取 60° 。可得为:

$$= 2 \times (7^\circ + 1^\circ) + 60^\circ = 76^\circ \quad (16)$$

忽略二次系统的传输时延,则 PMU 差电流的计算值为:

$$I_{PMU} = I_{PMU1} - I_{PMU2} = 2I_m \sin \left(2ft + \frac{\alpha}{2} + \frac{\alpha_{PMU}}{2} \right) \sin \frac{\alpha_{PMU}}{2} \quad (17)$$

在 PMU 能正常接收全球定位系统(GPS)信号时,利用同步时钟秒脉冲对 PMU 的采样脉冲进行同步,采样脉冲的同步误差不大于 $1 \mu s$ ^[12]。对稳态下的工频信号,2套 PMU 之间 $\pm 1 \mu s$ 的同步误差所对应的电角度 α_{PMU} 为 0.036° ,此误差因数值太小可忽略不计。当 PMU 不能正常接收 GPS 信号时,其采样脉冲的同步误差会随着时间的延长而逐步增大,具体数值因装置间的守时能力不同而有较大差异。因此,当任一 PMU 失去 GPS 信号时,宜将其有关联的所有继电保护装置的隐藏故障监视暂时停止。由此,可以不考虑 PMU 之间的采样同步误差,令 $\alpha_{PMU} = 0$,将式(17)简化为:

$$I_{PMU} = 2I_m \sin \left(2ft + \frac{\alpha}{2} \right) \sin \frac{\alpha}{2} \quad (18)$$

将继电保护装置之间的同步和 PMU 与继电保护装置的同步合并在一起讨论。设线路 MN 两侧继电保护装置的电流采样值分别为:

$$I_{P1} = I_m \cos(2ft + \alpha + \alpha_{P1}) \quad (19)$$

$$I_{P2} = I_m \cos(2ft + \alpha + \alpha_{P2}) \quad (20)$$

式中: α_{P1} 和 α_{P2} 分别为 M 侧和 N 侧继电保护装置相对于 PMU 的采样同步相角差。

继电保护装置差电流的计算值为:

$$I_P = I_{P1} - I_{P2} = 2I_m \sin \left(2ft + \alpha + \frac{\alpha_{P1} + \alpha_{P2}}{2} \right) \sin \frac{\alpha_{P2} - \alpha_{P1}}{2} \quad (21)$$

同步误差与 I_{zd} 的关系为:

$$I_{zd} = I = 2I_m \left| \sin \left(2ft + \alpha + \frac{\alpha_{P1} + \alpha_{P2}}{2} \right) \sin \frac{\alpha_{P2} - \alpha_{P1}}{2} \right| \quad (22)$$

由式(22)可见,继电保护装置与 PMU 之间的采样同步性将直接影响判据门槛取值的高低,即影响隐藏故障检测的灵敏度。

对于光纤纵差保护装置之间数据的同步问题,

各生产厂家通常采用采样数据修正法、采样时刻调整法、参考相量同步法和 GPS 同步法等几种解决方案。其中,前 2 种解决方案都是基于光纤通道收、发延时相等的等腰梯形算法,后 2 种解决方案则与通道无关,但参考相量同步法受输电线路参数和电气量测量误差的影响,其精度不能得到保证;GPS 同步法依赖于 GPS 对时,可以达到相当高的精度^[13]。

由上可知,采用不同的同步方法会有不同的同步误差源产生。当光纤纵差保护装置采用 GPS 同步法时,其精度与 PMU 相当, α_{P1} 和 α_{P2} 很小,可以忽略装置的采样同步性对 I_{zd} 的影响。

2.4 门槛值计算

2.4.1 门槛值计算公式

由前所述,当光纤纵差保护装置采用 GPS 同步法时,可忽略采样同步性的影响。考虑到 PMU 的可靠性及准确度都比继电保护装置高,用 PMU 的电流测量值 I_{PMU} 代替二次电流的准确值 I 。因正常运行时二次电流与额定值差别不大,将额定电流情况下的 PMU 和继电保护装置的电流幅值测量误差(分别为 $\pm 0.2\%$ 和 $\pm 0.5\%$)代入式(13),得继电保护信息主站报警差电流门槛值 I_{zd} 的实用计算公式为:

$$I_{zd} = 2K_k I_{PMU} (0.007 + \alpha_{TAM} + \alpha_{TAP}) \quad (23)$$

式中: K_k 为可靠系数,可取 $1.1 \sim 1.2$ 。

2.4.2 电流互感器与 I_{zd}

根据《电力系统实时动态监测系统技术规范》的规定,PMU 的交流电流回路既可接入保护电流互感器,也可接入测量电流互感器,2种接法各有其优缺点。若接入测量电流互感器,稳态测量精度较高而暂态精度差,接入保护电流互感器则正好与之相反。

在输入电流为额定值的情况下,5P 级与 10P 级保护电流互感器的误差分别为 $\pm 1\%$ 和 $\pm 3\%$ 。取可靠系数为 1.1。当 PMU 分别接入测量电流互感器和保护电流互感器时,计算 I_{zd} 的大小:

1) PMU 装置接入测量电流互感器

设测量电流互感器为 0.5 级、保护电流互感器为 5P 级,在二次电流为 5 A 时,有 $I_{zd} = 2 \times 1.1 \times 5 \times (0.007 + 0.005 + 0.01) = 0.242$ (A)

2) PMU 接入保护电流互感器

设 PMU 和保护装置均接入 5P 级保护电流互感器,则当二次电流为 5 A 时,有 $I_{zd} = 2 \times 1.1 \times 5 \times (0.007 + 0.01 + 0.01) = 0.297$ (A)

可见,PMU 与电流互感器的连接方式对 I_{zd} 的影响不大。不管接入测量电流互感器还是保护电流互感器,都可以利用 PMU 的测量值进行隐藏故

障的判断。

2.4.3 采样误差与 I_{zd}

在式(22)中,取 $I_m = 7.071 \text{ A}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $\alpha = 0^\circ$,则两侧的电流相角差为: $\Delta\theta = 76 / 180 = 1.326 \text{ (rad)}$ 。

设两侧继电保护装置的采样同步误差分别为 $-1 \mu\text{s}$ 与 $1 \mu\text{s}$,即 p_1 与 p_2 分别为 -0.0003 和 0.0003 。由此,可计算出同步误差引起的 I 为:

$$I_{zd} = I = 14.142 | \sin(314t + 0.663) \cdot \sin 0.663 - \sin(314t + 0.663) \cdot \sin 0.663 | = 0.0033 | \sin(314t + 0.8465) |$$

此时,由采样同步误差引起的 I 有效值仅为 $0.0033 / 1.414 = 0.0024 \text{ (A)}$,与幅值测量误差引起的 I 相比,不足其 1% ,可以忽略不计。

3 结语

继电保护隐藏故障的诊断是一项十分困难的工作。本文从继电保护的動作机理出发,将继电保护隐藏故障诊断划分为 2 个环节,即静态特性监视和动态特性监视,并进而提出获取继电保护装置外部参考信息,实现对继电保护装置隐藏故障诊断方法。

由于 WAMS 能够精确地测量电力系统的电流相量等参数,本文提出了以 WAMS 的测量值作为基准实现继电保护系统静态特性隐藏故障诊断的方法,建立了相应判据,并以输电线路光纤差动保护为例,对判据门槛的确定进行了详细分析。

通过对采用 GPS 同步法的光纤纵差保护装置的隐藏故障诊断判据的分析表明,本文提出的继电保护静态特性监视及隐藏故障诊断方法是有效和实用的,对于扩展继电保护信息系统功能、提高电力系统运行可靠性将具有重要作用。

参考文献

- [1] ELIZONDO D C, DELA REEJ, PHADKE A G, et al. Hidden failures in protection systems and their impact on wide-area disturbances// Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting: Vol 2, January 28-February 1, 2001, Columbus, OH, USA: 710-714.
- [2] ELIZONDO D C, DELA REEJ. Analysis of hidden failures of protection schemes in large interconnected power systems// Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting: Vol 1, June 6-10, 2004, Denver, CO, USA: 107-114.
- [3] 甘德强,胡江溢,韩祯祥. 2003 年国际若干停电事故思考. 电力系统自动化,2004,28(3):1-4.
GAN Deqiang, HU Jiangyi, HAN Zhenxiang. After the 2003 blackouts across several continents. Automation of Electric

- Power Systems, 2004, 28(3): 1-4.
- [4] DELA REEJ, LIU Y, MILIL, et al. Catastrophic failures in power systems: causes, analyses, and countermeasures. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 956-964.
- [5] 鲁宗相. 电网复杂性及大停电事故的可靠性研究. 电力系统自动化,2005,29(12):93-97.
LU Zongxiang. Survey of the research on the complexity of power grids and reliability analysis of blackouts. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(12): 93-97.
- [6] TAMRONGLAK S. Analysis of power system disturbances due to relay hidden failures[D]. Blacksburg, VA, USA: Virginia Polytechnic and State University, 1994.
- [7] PHADKE A G, THORP J S. Expose hidden failures to prevent cascading outages [in power systems]. IEEE Computer Applications in Power, 1996, 9(3): 20-23.
- [8] 易俊,周孝信. 基于连锁故障搜索模型的降低电网发生连锁故障风险的方法. 电网技术,2007,31(6):19-22.
YI Jun, ZHOU Xiaoxin. Analysis on method of decreasing the risk of cascading failures in power systems based on cascading failure searching model. Power System Technology, 2007, 31(6): 19-22.
- [9] 朱永利,宋少群,朱国强,等. 地区电网保护定值在线校验智能系统. 电力系统自动化,2005,29(6):87-92.
ZHU Yongli, SONG Shaoqun, ZHU Guoqiang, et al. An intelligent system for on-line verification of relay settings in sub-transmission networks. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 87-92.
- [10] 吕颖,孙宏斌,张伯明,等. 在线继电保护智能预警系统的开发. 电力系统自动化,2006,30(4):1-5,53.
LÜ Ying, SUN Hongbin, ZHANG Boming, et al. Research and development of an online intelligent early warning system of protective relaying. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 1-5, 53.
- [11] 丁军策,蔡泽祥,王克英. 基于广域测量系统的状态估计研究综述. 电力系统自动化,2006,30(7):98-103.
DING Junce, CAI Zexiang, WANG Keying. An overview of state estimation based on wide-area measurement system. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 98-103.
- [12] 杨贵玉,江道灼,邱家驹. 相角测量装置的同步测量精度问题. 电力系统自动化,2003,27(14):57-61.
YANG Guiyu, JIANG Daozhuo, QIU Jiaju. Synchronous measurement precision of phasor measurement unit. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(14): 57-61.
- [13] 高厚磊,江世芳,贺家李. 基于 GPS 的电流纵差保护设计及试验. 电力系统自动化,2001,25(21):61-65.
GAO Houlei, JIANG Shifang, HE Jiali. Design and testing of GPS based current differential protection. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(21): 61-65.

熊小伏(1962—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统保护与监控。E-mail: cqxxf@vip.sina.com

刘晓放(1975—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电力系统保护。E-mail: liuxf6271@163.com

(下转第 19 页 continued on page 19)

- calculating closest point collapse. Power System Technology, 2006, 30(3): 13-17.
- [8] 何宇,彭志炜,张靖. 电力系统最近电压崩溃点的确定. 贵州工业大学学报:自然科学版,2004,33(6):26-29.
HE Yu, PENG Zhiwei, ZHANG Jing. Computation of closest voltage collapse point in power system. Journal of Guizhou University of Technology: Nature Science Edition, 2004, 33(6): 26-29.
- [9] 常乃超,何光宇,梅生伟,等. 注入空间中电压安全域最短半径的估计. 电力系统自动化,2008,32(3):1-3.
CHANG Naichao, HE Guangyu, MEI Shengwei, et al. Estimation of the shortest radius of power system voltage security region in node injection space. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 1-3.
- [10] KATAOKA Y. A probabilistic nodal loading model and worst case solutions for electric power system voltage stability assessment. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(4): 1507-1514.
- [11] 胡泽春,王锡凡,程浩忠. 最近电压稳定临界点的两层规划模型和信赖域算法. 中国电机工程学报,2008,28(1):6-11.
- HU Zechun, WANG Xifan, CHENG Haozhong. A bilevel programming formulation and trust region approach for closest critical point of voltage stability. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 6-11.
- [12] 熊宁,程浩忠,马则良,等. 负荷不确定性电网的电压稳定性评价方法. 电力系统自动化,2008,32(8):24-27.
XIONG Ning, CHENG Haozhong, MA Zeliang, et al. Voltage stability assessment method for power system with load uncertainty. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 24-27.

熊宁(1975—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:输电网电压稳定与配网优化。E-mail:civilaviation@hotmail.com

程浩忠(1962—),男,博士,博士生导师,主要研究方向:电压稳定、电网规划、电能质量、电力市场。

李曼丽(1982—),女,硕士,主要研究方向:电力系统信息化和配网优化。

A Static Voltage Stability Evaluation Method Based on Confidence Intervals

XIONG Ning¹, CHENG Haozhong¹, LI Manli², XUE Yingcheng¹

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Ganxi Power Supply Company of Jiangxi Province, Xinyu 338025, China)

Abstract: Under the condition that load and its increasing pattern is uncertain, a novel voltage stability evaluation model with interval expression is given. This model can tackle the interval characteristics of the variables and can consider the probability distribution of these variables. The proposed approach provides a new light for static voltage stability evaluation under uncertain conditions. Linear programming is employed to solve this shortest path problem with two terminals being not fixed. At last, the speed and efficiency of the proposed method are tested on IEEE 30-bus power system.

This work is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2009CB219703).

Key words: static voltage stability; probability interval; confidence factor; linear programming; power system

(上接第 15 页 continued from page 15)

Monitoring of Static Characteristics and Diagnosis of Hidden Failures in Protection System Based on WAMS

XIONG Xiaofu, LIU Xiaofang

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Hidden failures in protection system are great threats to the operation of power grids, while there are almost no on-line diagnostic methods for hidden failures so far. To solve this problem, this paper proposes a new method for exploring the hidden failures in protection system. By comparing the calculated values from measurements of wide-area measurement system (WAMS) and from relay protection, this method realizes the real-time monitoring of static characteristics and diagnosis of hidden failures in protection system. The criterion for failure diagnosis is also developed. As an example, for an optical-fiber longitudinal differential protection of transmission lines, the setting method for hidden failure criterion's threshold is analyzed.

This work is jointly supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CB217908) and National Natural Science Foundation of China (No. 50777068).

Key words: static characteristic; hidden failure; WAMS; status monitoring; protection system