

有载调压变压器对电压稳定性影响综述

王光亮

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 有载调压变压器被认为是造成电压崩溃的重要因素之一。对国内外有载调压变压器对电压稳定性的影响研究作了概述。从延时上对 OLTC 进行了分类, 介绍了用于机理分析的等值模型, 运用 P-V 和 P-G 曲线解释了其影响机理, 强调 OLTC 动态对电压稳定带来不利影响的同时也扩大了传输功率极限。分析了调节步长、电压死区、延时等 OLTC 参数对电压稳定的影响, 恒阻抗、恒功率、恒电流和电动机负荷模型下的影响差异, 使得自动调节特性变坏的各种运行控制措施。并对今后的研究提出了建议。

关键词: 电压稳定; 有载调压变压器; 电压崩溃; 机理

A survey on effect of on-load tap changer on the voltage stability

WANG Guang-liang

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: On-load tap changer (OLTC) is considered to be one of the important factors that results in voltage collapse. In this paper, studies on the OLTC effect in voltage stability both at home and abroad are summarized. The OLTCs are classified by time delay. The equivalent model for mechanism analysis is introduced. The mechanism of its impact is explained using P-V and P-G curves. It is stressed that OLTC dynamic in voltage stability not only brings the adverse effect but also expands the power transmission limit at the same time. This paper analyses the impact of OLTC parameters such as adjustment steps, bandwidth, time delay on voltage stability, the different impact of constant impedance, constant power, constant current and electric motor load model, the various operational control measures that deteriorate automatic adjustment. And suggestions for the future research are provided.

Key words: voltage stability; on-load tap changer (OLTC); voltage collapse; mechanism

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)11-0079-06

0 引言

电压稳定问题是当前电力系统研究的一个热点问题。之所以引人注目, 是因为近 20 年来, 在发达国家中发生了多起电压崩溃事故, 造成了巨大的损失。随着研究的深入, 人们对电压稳定的认识已经有一定进展, 陆续发表了许多有关的专著^[1~4]。但相比较为成熟的功角稳定还有较大差距。关于电压稳定的研究历史及现状可参见相关文献[5~7]。吴浩在其博士论文^[8]及与程浩忠的合著^[9]中, 对各种电压稳定机理的解释做出了评述。

自从开始研究电压稳定问题, 有载调压变压器(简称为 OLTC)就受到特别关注, 普遍认为它在电压稳定问题中起着重要作用。有载调压变压器(OLTC)动态与发电机无功越限和负荷动态被并列为造成电压失稳的三大因素。

1 有载调压变压器的分类及模型

1.1 有载调压变压器的分类

典型的 OLTC 有 32 个分接头(16 个在基准值之上, 16 个在基准值之下), 每改变一次分接头, 相应电压变化为额定值的 0.625%, 分接头由升降电动机来带动, 电动机每改变一次分接头所需的时间约为 10 s, 这一延迟是通常不可忽略, 因为该过程是由机械装置来完成的。

有载调压变压器控制的基本步骤如下: 接收电压互感器传来的信号, 当中枢点电压偏差超出其死区(也称灵敏区)时, 启动定时器, 经定时器延时之后, 电动机启动, 带动分接头改变变压器的变比, 该过程所需的时延称为机械延时。

机械延时是固定的, 而定时器延时则可以有固定延时和反时限延时(电压跌落越大, 延时越短)。

OLTC 有两种控制方式, 一种是非时序方式, 每次分接头改变以后, 定时器都要返回, 另一种是时序方式, 只有当电压值又返回到控制范围之内时, 定时器才会返回, 即当分接头改变以后, 如果中枢纽点电压偏差仍大于 $DB/2$ (DB 为 OLTC 死区), 则下一次分接头的改变就不再需要定时器延时了, 只含有电动机的机械延时。

1.2 有载调压变压器的模型

通常假设变压器的电阻和励磁电抗忽略不计, 且其漏电抗不变。与普通变压器的不同关键在其变比调节部分, 分离散模型、连续模型以及离散—连续模型三类。

在离散模型中, OLTC 的变比调节是瞬间完成的。连续 OLTC 模型是基于一个假设, 即分接头变换可以连续地取得在最大和最小之间的任意值。通常对于连续型 OLTC 模型, 死区的影响可以忽略。

在电力系统分析中, 变压器一般用其等值模型代替, 为了从机理方面研究 OLTC 调整对电压稳定的影响, 很多文章^[10~13]都使用了如图 1 的简单模型, 其中的理想变压器变比为 $n:1$ 。这样的简化往往是有效的。

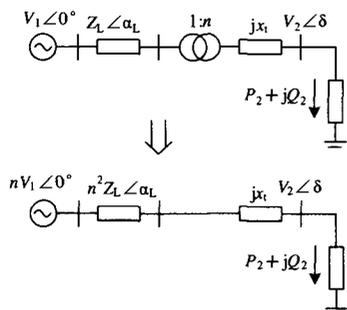


图 1 系统简单模型

Fig. 1 A simple model system

1.3 有载调压变压器与负荷恢复

由 OLTC 完成的负荷恢复这一过程是间接的, 在 OLTC 将低压侧的电压恢复到接近其基准电压之后, 则基本由母线电压决定的负荷功率也被恢复了。

由于 OLTC 为响应较慢的设备, 因此, 在研究 OLTC 恢复负荷的特性时, 快速响应的发电机和异步电动机就可以用它们的静态方程式来代替, 这样就只要考虑 OLTC 的动态过程。

2 有载调压变压器对电压稳定性影响的机理分析^[10, 11, 14]

2.1 OLTC 引起的电压崩溃

OLTC 的调整并不总是有益的, 实际上在某些

情况下 OLTC 的调整还是灾难性的。可以认为, OLTC 的作用等价于在空载电压高的一侧并联电容器, 而在空载电压低的一侧并联电抗器, 随着变比 n 的变化, 将会影响变压器两侧无功潮流的分布, 进而影响变压器两侧电压的变化。当系统无功缺额较大, 而负荷侧电压 V_2 偏低时, 如果此时增大 OLTC 的变比。而试图使 V_2 升高, 势必会加大高压侧对电网无功的需求, 从而使高压侧电压严重下降, 可能引起电压的崩溃。

2.2 P—V 曲线解释

常用的方法是 P-V 曲线分析: 这里假定系统负荷为等值电动机。

(1) 系统初始状态稳定, 运行点 C 在“负调压效应”临界点 B (OLTC 调整前、后两条 P—V 曲线的交点) 的左上方: 由图 2 可见, 若 OLTC 因负荷侧电压偏低进行调整, 变比 $n_1 \rightarrow n_2$, 由于调整瞬间转差不会突变, 如图 2 所示, 运行点将由 C 点沿负荷特性曲线 L_1 移动, 与另一条系统 P—V 曲线 ($n=1.10$) 相交于 C_1 点, 该点因电动机电磁功率大于机械功率, 故加速, 经过一段时间后可稳定运行于 C_2 , 负荷电压因 OLTC 调整得到提高, 这也即是 OLTC 具有“正调压效应”的机理。

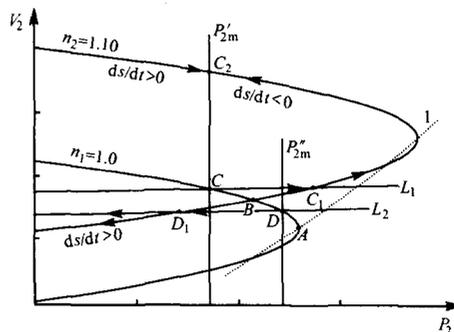


图 2 P—V 曲线解释

Fig. 2 P-V curve

(2) 系统初始状态稳定, 运行点 D 在“负调压效应”临界点 B 的右下方: 由图 2 可见, 当 OLTC 发生调整, 变比 $n_1 \rightarrow n_2$, 由于调整瞬间转差不会突变, 运行点将由 D 点沿负荷特性曲线 L_2 移动, 与另一条系统 P—V 曲线 ($n=1.10$) 相交于 D_1 点, 该点因电动机电磁功率小于机械功率, 电动机减速, 电磁功率反而下降, 随着时间的推移, 负荷消耗的功率愈来愈小, 电压亦不断下跌, 即发生电压失稳现象。

2.3 P—G 曲线解释 (见图 3)

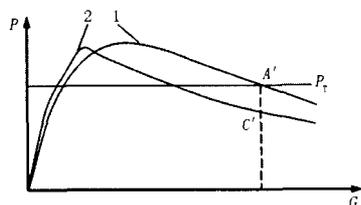


图3 P—G曲线解释

Fig. 3 P-G curve

或许P—G曲线解释有利于理解。A'点是功率平衡点。如果OLTC的变比由 $n_1 \rightarrow n_2$ ($n_1 < n_2$)，因为负荷的等效导纳不能突变，系统运行于C'点，这时负荷的有功功率平衡遭到破坏，输入的电磁功率小于输出的其他形式的功率，按照负荷动态特性，负荷导纳将增大，但导纳的增大使输入的电磁功率更小，扩大了功率不平衡量，导纳增大更快，导致负荷节点电压加速下降，形成电压崩溃。

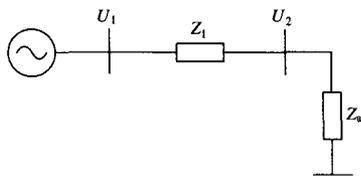


图4 简单系统阻抗

Fig.4 Impedance of a simple system

电压崩溃的机理可见一斑，核心在于，网络和发电机都有阻抗，电源不是理想的，负荷的等效阻抗在减小到一定数值以后，随着阻抗的进一步减小，负荷测消耗的功率反而会减小。

3 OLTC动态对电压稳定性的影响

3.1 OLTC动态对电压稳定性的影响

因为OLTC为离散调节，且时间常数大，无论是对于静态电压稳定性还是对于暂态电压稳定性和电压崩溃过程，OLTC动态本身对电压稳定性的影响皆很小，把OLTC调节所引起的原方电压下降划为电压失稳全过程的一个组成时段是不正确的。值得重视的是OLTC调节结束，即变比的变化对负荷注入空间中平衡点位置的影响。分析OLTC对电压稳定性的影响，可以归入一个静态问题，即OLTC变比变化如何影响电压稳定域和负荷功率，而不必计及其动态方程。

很多文章对OLTC对电压稳定的影响进行了动态建模分析^[14~18]，N. Yorino和C. C. Liu对单台和多台OLTC的动态影响进行了分析^[15,16]，T.X.Zhu等基于简单系统和多机系统，用解析的和数字的方法

对有载调压变压器动作对电压稳定的影响进行了讨论。得出，在计及负荷恢复时，OLTC动作增大传输到负荷中心的功率极限正是由于使得线路变压器阻抗和负荷补偿后的等值阻抗相匹配^[12]。即有载调压变压器如何影响最大传输功率极限（因为严格求取静态电压稳定临界点存在困难，常把网络的极限输送能力作为临界功率的近似值）。除了恢复负荷电压，有载调压变压器也增加了传输功率能力。整体的影响有利或有害取决于系统能否平衡由同一有载调压变压器带来的传输功率极限和恢复负荷的增加。

3.2 特殊失稳模式

OLTC变比的变化是不连续的，这可能使系统由稳定运行区域跳变到不稳定运行区域，这就是所谓特殊失稳模式。

段献忠在文献[11]指出，如果要发生上述形式的电压崩溃，则初始运行点必须非常靠近静态电压稳定的近似临界点，这时系统的静态电压稳定裕度很小，系统中其他因素的正常波动，如新负荷的投入，也可能使系统由稳定运行区域跳变到不稳定区域，以上模式并无特别意义。

3.3 OLTC动态对大扰动后电压稳定性的影响

第一种情况是快速动态负荷无法实现新的功率平衡，发生了快速的电压崩溃，在OLTC来不及动作的情况下，系统运行点穿越故障后稳定域的边界，最后失去稳定。在分析这种暂态过程时可以不计及OLTC的动态。

另一种情况是系统开始是稳定的，在快速动态平息下来以后，因为慢速动态元件(如OLTC，温度控制型动态负荷等)的作用，有时还伴随有负荷需求的增长，在大扰动发生一段较长的时间后(从十几秒到十几分钟)，系统失去电压稳定。大扰动下，系统运行点已非常接近故障后稳定域的边界，这时系统的稳定裕度本身不够，其他许多因素也可能诱发电压崩溃事故，OLTC的作用并不特别重要。

因此，在系统扰动比较大时，OLTC对系统的稳定不起作用。

4 OLTC参数对电压稳定性影响

主要指有载调压变压器的调节步长，电压范围(死区)，延时对电压稳定性影响。

T.X.Zhu等用仿真的方法对之进行讨论^[12]。较大的调节步长能提供更大的功率传输极限。当调节步长达到某一数值后(这里是0.009)，进一步能增加的功率传输极限就变得有限。电压范围的影响却有很大不同，即，较小的电压范围有利于获得较大的功率传

输极限增加。至于延时对功率传输极限的影响,较小的机械延时(分接头调整时间)是有益的,即,较小的机械延时有利于获得较大的功率传输极限增加。作为极端情况,功率传输极限仅 0.699 893,当机械延时达到无穷大时。

太小的电压范围和延时会使 OLTC 频繁动作,势必增加磨损,缩短寿命,也不利于系统稳定。

至于文献[19]中提到的输电距离对电压稳定的影响,是显而易见的,之所以出现电压稳定问题,根本在于远距离送电造成的负荷中心缺乏无功支撑,缩短输电电气距离能够加强联系,有利于各种电力系统稳定问题。

5 不同负荷模型下 OLTC 对电压稳定的影响

在研究电压稳定问题时,一个不可避免的问题是负荷模型,因为它在某些情况下会成为决定因素。李颖等应用 Eurostag 仿真研究有载调压变压器在系统不同的负荷特性下对中长期电压稳定性的影响。认为,有载调压变压器表现出“正调压效应”还是“负调压效应”主要取决于系统低压侧的负荷特性^[18]。

综合的负荷模型包括 $P = aV^2 + bV + c, Q = KP$ 加马达(微分方程),其中的各种特殊情况便是恒功率、恒电流、恒阻抗、纯电动机。有关文献^[20,21]对此已做了讨论,结论基本明确。

恒功率负荷($a=b=0$): 恒功率的情况最简单。系统中的负荷都是恒功率特性,对电压不敏感,不涉及分接头变化引起负荷恢复的问题,无论电压降低与否,不管变压器分接头动作还是不动作,系统中的负荷都是一样的,所以电压越低,损耗越大;电压越高,损耗越小。因此,有载调压变压器在系统是恒功率负荷特性时,能表现出很好的“正调压效应”。

恒阻抗负荷($b=c=0$): 变压器低压侧接有恒阻抗特性负荷。OLTC 具有三个调压效应区:“正调压效应”区、“负调压效应”区及“混合调压效应”区。

恒电流负荷($a=c=0$): 恒电流性负荷与恒阻抗性负荷同属于电压敏感性负荷,两者的情形相似。

对纯电动机,情况比较复杂,OLTC 一方面使负荷的功率恢复,高压侧电压下降,另一方面又使功率传输极限增大,应进行具体分析。

共同的是 OLTC 动作都会增加功率传输极限,不同在于负荷的恢复情况。对电压灵敏度越高的负荷,典型的就是恒阻抗负荷,在系统条件接近极限时,有载调压变压器容易表现出“负调压效应”。大量分接头动作恢复负荷的群体运动是最终引起系

统电压崩溃的直接原因。而受有载调压变压器调压影响不大的负荷特性,典型的就是恒功率负荷,有载调压变压器对系统电压的稳定是相当有利的,表现出很好的“正调压效应”。

6 考虑电压稳定问题时的 OLTC 运行控制措施

既然 OLTC 的动作被导致电压崩溃的因素之一,人们就要防止它,这类措施其实就是让 OLTC 根据电压自动调节分接头的特性变坏。

(1) 闭锁 OLTC 的有载调压,将使负荷节点电压维持在比较低的水平,负荷功率不能完全恢复,有助于避免系统电压失稳并可以减少在用于防止电压失稳的电容器和其他静止无功补偿装置上的投资,在系统大范围的电压波动过程中紧急闭锁 OLTC 的有载调压。

(2) 限制 OLTC 分接头的调节范围,使之只够满足日常的区域性的电压波动。调节范围限制在 3% 到 6% 已完全可以满足上述要求。

(3) 反调 OLTC,利用设计巧妙的 OLTC 紧急调压方案,在系统的电压动态波动过程中,当系统电压大幅度下沉时,使 OLTC 二次侧电压下降得比一次侧快。事实上,这样的调压手段是在系统变得脆弱的情况下的减负荷措施。

(4) 延迟 OLTC 分接头的动作时间,从有助于系统电压稳定的角度看,具有比较长的延迟时间的恒定时延控制方式比较好(反时限特性最差),因为在这种时延方式下,系统负荷功率的恢复速度比较慢。

实际运行中以上措施会受到一些因素的限制^[22,23],这些因素主要来自负荷^[15]。必须根据具体情况进行分析。在某些情况下 OLTC 的自动调节作用对电压稳定的有利作用主要针对电压敏感性负荷,当负荷具有恒功率特性时,OLTC 调节不会使负荷功率变化,只会使负荷稳定域扩大。

上述措施是牺牲用户的电压质量来换取安全,是在紧急情况下为保证系统稳定,避免电压崩溃时,才可采用的,否则就违背了装设 OLTC 的初衷。靠闭锁 OLTC 来限制负荷功率的恢复对解决电压崩溃问题的作用是有限的。OLTC 连续调节导致电压失稳是比较缓慢的过程,完全来得及采取有效的其它控制措施(增大发电机无功出力,投入补偿等)。因此,在还存在其也有效手段的情况下未必是可取的。

7 结论

在对 OLTC 对电压稳定的影响做出机理解释

时,经典的简化模型往往是有效的。如何恰当地考虑元件动态特性,建立尽可能简化又能较精确反映系统动态的分析模型值得继续深入研究。

除了恢复负荷电压,有载调压变压器也增加了传输功率能力。整体的影响有利或有害取决于两者的关系。OLTC 动态和自身参数对电压稳定性的影响也需要更精确的分析。

对于电压稳定本身来说,负荷恒功率的性质越强,则电压稳定问题越突出,对于恒阻抗类型负荷来说,不存在电压崩溃的可能。但是对于OLTC影响负荷功率来说,负荷恒阻抗的性质越强,则OLTC对负荷功率的影响越大。可见有关负荷模型的研究不可或缺。

对于让OLTC根据电压自动调节分接头的特性变坏的各种控制措施,是在紧急情况下为保证系统稳定,避免电压崩溃时,才可采用的。如何对OLTC和其它紧急控制加以协调。避免这些控制手段之间的不配合所导致的系统崩溃。如何将这些控制策略付诸实际应用,如何根据潜在的失稳模式进行预防控制等是应进一步研究的课题。

对 OLTC 的作用下一个简单的结论是不恰当的,必须根据具体的系统情况和负荷特性进行具体分析研究。

参考文献

- [1] Taylor C W. Power System Voltage Stability[M]. New York: Mc-Graw-Hill, 1994.
- [2] Cutsem T V, Vournas C. Voltage Stability of Electric Power System [M]. Norwell, Massachusetts: Kluwer, 1998.
- [3] 余贻鑫,王成山. 电力系统稳定性的理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
YU Yi-xin, WANG Cheng-shan. Theories and Methods on Stability of Power Systems[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [4] 周双喜,朱凌志,郭锡玖,等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi, GUO Xi-jiu, et al. Power System Voltage Stability and Control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [5] 苏永春,程时杰,文劲宇,等. 电力系统电压稳定性及其研究现状(一)(二)[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(6)(7): 97-101, 97-100.
SU Yong-chun, CHENG Shi-jie, WEN Jin-yu, et al. Power System Voltage Stability and Its Present Investigation(1)(2)[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(6)(7): 97-101, 97-100.
- [6] 余贻鑫,李国庆,等. 电力系统电压稳定性的基本理论与方法(一)-(六)[J]. 电力系统自动化, 1996, 20: (6-11).
YU Yi-xin, LI Guo-qing, et al. Basic Theories and Methods on Voltage Stability of Power Systems(1)-(6)[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20: (6-11).
- [7] 傅旭,王锡凡,杜正春. 电力系统电压稳定性研究现状及其展望[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(2): 1-9.
FU Xu, WANG Xi-fan, DU Zheng-chun. Survey of Power System Voltage Stability Study[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(2): 1-9.
- [8] 吴浩. 电力系统电压稳定研究(博士学位论文)[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
WU Hao, Researches on Voltage Stability in Power System, Doctoral Dissertation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [9] 程浩忠, 吴浩. 电力系统无功与电压稳定性[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
CHEN Hao-zhong, WU Hao. Reactive Power and Voltage Stability in Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [10] 彭志炜, 胡国根, 韩祯祥. 有载调压变压器对电力系统电压稳定性影响的动态分析[J]. 中国电机工程学报 1999, 19(2): 61-65.
Peng Z W, Hu G G, Han Z X. Dynamic Analysis of the Power System Voltage Stability Affected by OLTC[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(2): 61-65.
- [11] 段献忠, 何仰赞, 陈德树. 有载调压变压器与电压稳定性关系的动态分析[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(1): 14-19.
DUAN Xian-zhong, HE Yang-zan, CHEN De-shu. Dynamic Analysis of the Relation Between On-load Tap Changer and Voltage Stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(1): 14-19.
- [12] Zhu T X, Tso S K, Lo K L. An Investigation into the OLTC Effects on Voltage Collapse[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 515-521.
- [13] Pereira R M M, et al. Influence of the Under Load Tap Changers on the Dynamic Voltage Collapse of an Electric Power System[A]. In: Universities Power Engineering Conference[C]. 2004. 1106-1110.
- [14] Ohtsuki H, Yokoyama A, Sekine Y. Reverse Action of on-load Tap Changer in Association with Voltage Collapse[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, (6): 300-306.
- [15] Yorino N, Galiana F D. Voltage Instability in A Power System with Single OLTC[J]. IEEE ISCAS, 1992. 2533-2536.

- [16] Liu C C, Wu F F. Analysis of Tap-changer Dynamics and Constriction of Voltage Stability Regions[J].IEEE Trans on Circuits and Systems, 1989,36.
- [17] 段献忠, 何仰赞, 陈德树. 有载调压变压器与电压稳定性关系的静态分析[J].电力系统自动化,1995, 19(4): 22-27.
DUAN Xian-zhong, HE Yang-zan, CHEN De-shu. Static Analysis of the Relation Between On-load Tap Changer and Voltage Stability[J].Automation of Electric Power Systems, 1995,19(4): 22-27.
- [18] 李颖, 韦斌, 贺仁睦. 有载调压变压器对系统中长期电压稳定性影响的仿真研究[J].现代电力,2005, 22(2):25-28.
LI Ying, WEI Bin, HE Ren-mu. Simulation of ULTC Effect on Mid-long Term Voltage Stability in Power Systems[J]. Modern Electric Power, 2005, 22(2): 25-28.
- [19] 彭志炜, 胡国根, 韩祯祥. 有载调压变压器对电压稳定性影响的静态分析[J]. 电力系统自动化,1998,22(5): 14-17.
Peng Z W, Hu G G, Han Z X. Static Analysis of the Effects of OLTC on the Voltage Stability[J].Automation of Electric Power Systems, 1998,22(5): 14-17.
- [20] WANG Liang, LIU Yu-tian, LUAN Zhao-wen. Voltage Stability Affected by On-load Tap Changer Considering Excitation Reactance of Induction Motor[A].In: Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering[C]. 2005 .2208 – 2211.
- [21] 彭志炜, 胡国根, 韩祯祥. 有载调压变压器调整对电力系统电压稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报 1998,18(6): 408-412.
Peng Z W, Hu G G, Han Z X. The Power System Voltage Stability Affected by On-load Tap Changer[J]. Proceedings of the CSEE, 1998,18(6): 408-412.
- [22] Calovic M S. Modeling and Analysis of Under-Load Tap-Changing Transformer Control Systems[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1984,103(7):1909-1918.
- [23] 丛岫, 鞠平, 吴峰.关于静态电压稳定中有载调压变压器的作用与控制[J].电力系统及其自动化学报,2002, 14(2):4-7.
CONG Shen, JU Ping, WU Feng.On the Mechanism and Control of on Load Tap Changer in Steady-State Voltage Stability[J].Proceedings of the EPSA , 2002, 14(2): 4-7.

收稿日期: 2007-09-30; 修回日期: 2008-01-30

作者简介:

王光亮(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析和运行控制。E-mail: powersystem@126.com

(上接第 78 页 continued from page 78)

参考文献

- [1] IEC 60255-1, Measuring Relays and Protection Equipment-Part 1: Common Requirements[S].
- [2] GB/T 14047 量度继电器和保护装置[S].
- [3] 杨剑峰, 贺春. 规约应用中存在的问题及解决方法的探讨[J].继电器, 2004, 32(19):71-73.
YANG Jian-feng, HE Chun. Problems and Solutions in Protocol Implementation[J]. Relay, 2004, 32(19): 71-73.
- [4] 赵有铨, 赵曼勇, 贺春. 继电保护故障信息系统建设经验谈[J].继电器, 2006,34(6): 64-66,70.
ZHAO You-cheng, ZHAO Man-yong, HE Chun. Experience in the Project Construction of Fault Information System for Relay Protection[J]. Relay, 2004, 34(6): 64-66,70.
- [5] Holstein D, Tengdin J, Udren E.IEEE C37.115-2003 Standard Test Method for Use in the Evaluation of Message Communications between Intelligent Electronic Devices in an Integrated Substation Protection, Control, and Data Acquisition System[Z].
- [6] Vandiver B, Apostolov A. Testing of IEC61850 Sampled Analog Values Based Functions[Z].
- [7] XIN Yao-zhong, ZHANG Zhi-gang, TAO Hong-zhu, et al. Study of Online Security Evaluation and Application in National Grid of China[A].In:CIGRE[C]. Paris:2006.
- [8] IEC 62351-1: Data and Communication Security – Introduction[S].
- [9] Corsi S, Cappai G, Valadè I. Wide Area Voltage Protection[A].In: CIGRE[C]. Paris: 2006.

收稿日期: 2008-05-06

姚致清(1960-), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事继电保护可靠性研究及相关标准制定工作, 目前正在进行超高压和特高压直流、交流输电保护及控制系统标准制定及项目研究。E-mail: zhiqingy@xjgc.com