

中性点不接地系统单相故障导致 TV 熔断机理分析

陆强 滕予非 唐明

(国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072)

摘要: 35 kV 低压配电系统中性点一般采用不接地方式,当低压母线发生单相短路,在故障消失后低压母线 TV 上会产生很高的过电压,造成铁心严重饱和,进而产生很高的过电流,此电流极有可能导致 TV 熔丝熔断;针对此问题推导了单相故障消失后 TV 过电流的物理机制并提出相应的抑制措施,最后通过 PSCAD/EMTDC 软件搭建了一个实际电力系统模型,验证了此物理机制并证明了抑制措施的可行性。

关键词: 单相接地故障; TV 熔断; 中性点不接地系统; PSCAD

Abstract: 35 kV distribution network is usually an isolated neutral system, when encountered an single-phase earth fault and after the fault disappears, a high voltage will be produced on TV of low-voltage bus which makes the core saturated seriously, and then a high current will occur, so the TV fuse has a extremely high risk to be fused. Aiming at the problem, the physical mechanism of TV overcurrent after a single-phase earth fault disappears is deduced and the corresponding suppression measures are proposed. At last, the PSCAD/EMTDC software is used to establish a real power system model to test the physical mechanism, and it proves the feasibility of the proposed suppression measures.

Key words: single-phase earth fault; TV fuse; isolated neutral system; PSCAD

中图分类号: TM713 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)02-0054-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.02.013

0 引言

2014年的5月26日、5月30日以及7月1日,四川攀枝花的110 kV白岩子变电站35 kV母线TV别发生了A相、C相以及B相熔丝熔断的情况。配电系统TV丝熔断不仅会影响电费的计量,造成很大的损失,严重时甚至烧毁TV^[1]。另外,高压熔断器本身的熔断也是一种损失,更换也比较麻烦。还有,当TV一次侧高压熔断器熔断时,可引起系统虚假接地,开口三角电压升高,引起继电器误动作,容易造成工作人员的误判,将其当成系统接地,而花费很多时间还找不到接地点。这些情况对于电力系统安全、稳定、可靠的运行都是十分不利的。因此,为保证电力系统的正常运行,电磁式TV压熔断器熔断^[2-3]的研究就显得非常重要^[4]。

在10 kV、35 kV中性点不接地配电网^[5]中,母线上安装的电磁式TV常采用的是Y0/Y0的接线方式;由于系统单相接地故障所引起的熔丝熔断问题时有发生,严重时甚至烧毁电磁式TV^[6],对其原理的研究将有助于采取有效的措施进行抑制。

1 事件梳理

根据攀枝花110 kV白岩子变电站35 kV母线TV丝的多次熔断事件,利用白岩子变电站录波文件,可以对7月1日35 kV III母TV B相高压侧熔丝熔断事件进行梳理,通过对该日19:47至20:42近1个小时的波形进行梳理。可以得到这段时期白岩子35 kV III母TV二次侧三相电压有效值的变化趋势如图1所示。

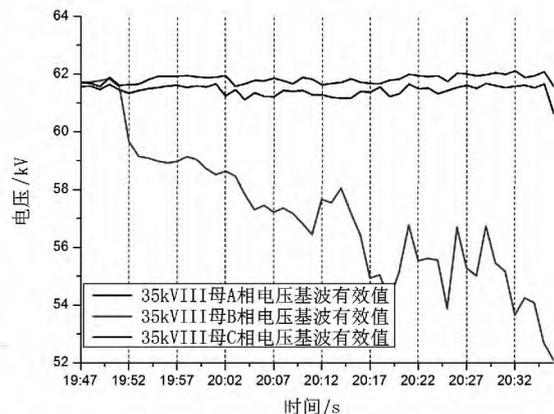


图1 白岩子35 kV III母TV二次侧三相电压有效值变化在19:52前白岩子变电站35 kV III母三相电压

保持基本平衡,而在 19:52 以后母线 B 相电压出现明显跌落,并在后续过程中持续下降。同时录波波形表明,母线 B 相电压畸变率也逐渐增加,三相零序电压明显上升。

图 2 所示是 7 月 1 日 23:44:49 白岩子 35 kV III 母 TV 二次侧三相电压波形,如图可知,此时 35 kV III 母 B 相电压的基波有效值已经跌落至 20 V,而 A、C 两相电压则保持正常。同时,通过录波可以发现此时 B 相电压畸变严重,三相零序电压有效值达到 25 V 以上。通过与攀枝花供电公司相关工作人员交流,认为该现象即为熔丝熔断现象。因此根据上述分析可以初步判断,7 月 1 日所发生的 110 kV 白岩子变电站 35 kV III 母 TV B 相熔丝熔断发生的初始时刻即为 19:52。

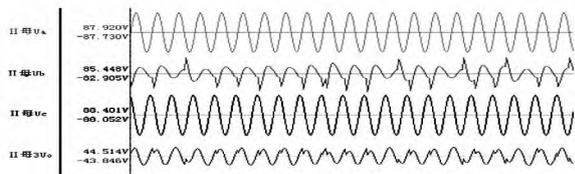


图 2 23:44:49 白岩子 35 kV III 母 TV 二次侧三相电压波形

2014 年 7 月 1 日 19:52:03 开始记录的白岩子 35 kV 母线电压波形如图 3 所示。

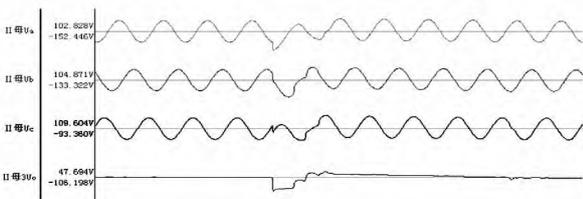


图 3 白岩子 35 kV III 母 TV 二次侧三相电压波形

由图 3 可知,19:52:03:847 白岩子 35 kV 侧网络出现了一次短时的 C 相接地故障,持续时间约为 8 ms。故障期间 C 相电压有明显下跌,而 A、B 两相电压则有明显的升高。故障发生前后,35 kV III 母 TV 的 B 相电压有效值从 61.572 V 下降至 59.67 V。综合图 1 与图 3 可以初步判断,19:52:03 在白岩子 35 kV 侧网络上所发生的 C 相接地故障,是导致 35 kV III 母 TV B 相高压侧熔丝熔断的直接原因。

2 熔断机理分析

经过分析,初步认为白岩子变电站 7 月 1 日 35 kV TV 高压侧熔丝熔断事件是由低压侧单相接地短

路故障消失后导致的,下面分析其机理。

对于中性点不接地系统,当一相接地时,另两相电压升高到线电压,它们的对地电容上也就充上了和线电压相适应的电荷。然而,当接地故障消失后,为了保持系统平衡,各相对地电压则力图恢复到正常运行的相电压的水平。在此过程中,故障期间在非故障相上所积累的电荷则需要一个释放的过程,即需要找到出路泄往大地。然而,由于系统中没有其他的泄流通路,自由电荷只好通过互感器的一次绕组泄往大地。在此过程中,极有可能引起 TV 铁心的饱和。具有过饱和铁心的电压互感器,在工频电源电压作用下也将出现很大的冲击电流。泄流电流与工频冲击电流共同作用,则可能造成熔断器熔断。

下面对其熔断原因进行数学方面的分析,此处采用注入虚拟补偿电量法^[7]对此问题进行分析。注入虚拟补偿电量计算的主要思路是:对于一个给定的电路,开关的通断操作认为是由两个等效过程叠加而成的,通断操作前电路中的稳态过程与由通断操作所引起的暂态过程“在开关的通断操作过程中,接通时电路会有回路电流出现,分断时断口两端会有端电压出现”,利用叠加原理,可以表达为

$$\begin{aligned} i &= \bar{i} + \tilde{i} \\ u &= \bar{u} + \tilde{u} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: \bar{i} 、 \bar{u} 为通断操作前的回路电流与电压; \tilde{i} 、 \tilde{u} 为通断过程引起的暂态电流和暂态电压; i 、 u 为通断过程的合成电流与合成电压。

为此,将 3TV 接法时的单相接地故障等效电路看作是电路图 4 与图 5 的叠加,其中图 4 所示电路相当于接地短路还在持续的工作状态,即单相接地故障的稳态等效电路。图 5 所示电路则相当于接地故障消除后的等效电路,由虚拟补偿电量法可知,接地故障的消除就相当在接地点又并接一个与原电流 I_{d0} 方向相反的电流源。

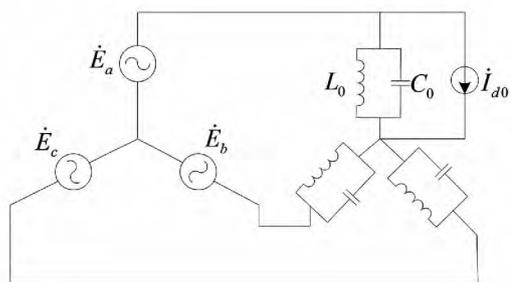


图 4 单相接地故障等效的稳态图

由图4设A相金属接地,忽略相间电容影响,戴维南等效图可求出单相故障时的稳态短路电流为

$$\dot{I}_{d0} = \left(\frac{\dot{E}_a}{1/j3\omega C_0} + \frac{\dot{E}_a}{j\omega L_0/3} \right) = (\omega C_0 - 1/\omega L_0) \times 3j\dot{E}_a \quad (2)$$

式中: L_0 为TV各相电感值; C_0 为各相对地电容。

由电源 \dot{E}_a 的瞬时值

$$e_a = E_m \sin(\omega t + \varphi)$$

可得短路电流的瞬时值为

$$i_{d0} = (\omega C_0 - 1/\omega L_0) \times 3jE_m \sin(\omega t + \varphi) = I_m \sin(\omega t + \varphi + 90^\circ)$$

式中 $I_m = (\omega C_0 - 1/\omega L_0) \times 3E_m$

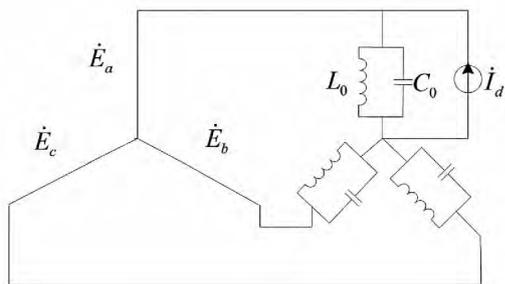


图5 单相接地故障消除后的等效的暂态电路图

再根据图5,可以推导当单相故障消失后,并考虑衰减因数的影响,可得此时加在TV两高压绕组两端的电压为

$$U(t) = E_m \sin(\omega t + \varphi) - E_m e^{-\delta t} (\cos\varphi \sin\omega t + E_m \frac{\omega'}{\omega} \sin\varphi \cos\omega' t) = E_m \sin(\omega t + \varphi) - E_m \sqrt{\cos^2\varphi + \frac{\omega'^2}{\omega^2} \sin^2\varphi} \times e^{-\delta t} \sin(\omega' t + \varphi') \quad (3)$$

式中: $\varphi' = \cos^{-1} \frac{\cos\varphi}{\sqrt{\cos^2\varphi + \frac{\omega'^2}{\omega^2} \sin^2\varphi}}$
 $\omega' = 1/\sqrt{L_0 C_0}$

等式(3)中第一项为电压的强制分量,它是不衰减的,而后一项则为电压的自由分量,是振荡衰减的,并且其幅值是初相角 φ 的函数,通常系统的 $\omega' < \omega$ 。

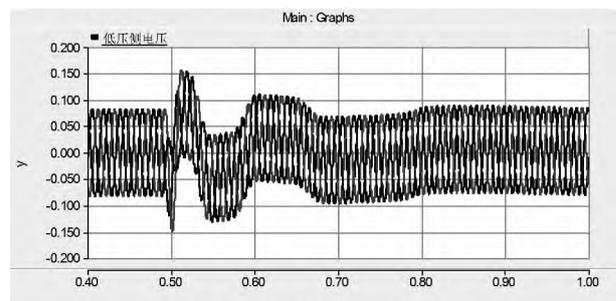
由于在高压绕组中出现频率为 ω' 的电压自由振荡分量,则在铁心中同样会有相同频率的自由振荡磁通,绕组中就会出现相应的自由振荡磁链 Φ 。由磁链关系 $U(\Phi) = d\Phi/dt$ 可得

$$\Phi = \int U dt = \frac{E_m \sqrt{\cos^2\varphi + \frac{\omega'^2}{\omega^2} \sin^2\varphi}}{\delta^2 + \omega'^2} \sin(\omega' t + \varphi' + \alpha) \quad (4)$$

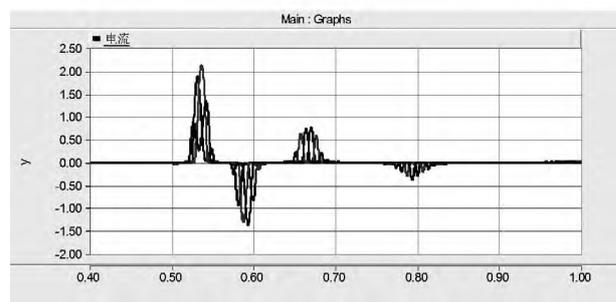
由式(4)可知其幅值 $|\Phi|$ 与初相角 φ 及 ω' 均有关系。馈线越长,对应的零序 C_0 越大,自由振荡频率 ω' 越小,但对应的 $|\Phi|$ 越大。在此振荡的作用下,互感器铁心半个周期将出现一次饱和,每次饱和相应的对应一次 ω' 频率的冲击电流,此冲击电流很有可能导致TV熔断。

3 仿真分析

利用PSCAD搭建白岩子变电站35kV电网的电磁暂态示意模型。设置 $t = 0.5$ s时,35kV网络内C相出现短时单相接地故障,持续时间8ms,接地阻抗1000Ω。由此,可以得到在熔丝不熔断的情况下,白岩子站35kV母线TV二次侧电压与高压侧电流如图6所示。



(a) 白岩子站35kV母线TV二次侧电压



(b) 白岩子站35kV母线TV高压侧电流

图6 仿真结果

由图6可知,在C相单相短路结束后,白岩子35kV母线上出现了一个低频的自由衰减分量,该分量导致TV出现饱和。仿真表明,该工况下35kV TV高压侧电流达到2.0A,超过了熔丝的额定电流0.5A,熔丝熔断概率较高。

对于中性点不接地系统,当一相接地时,正常相

电压将升高到线电压。当接地故障消失后,为了保持系统平衡,各相对地电压则力图恢复到正常运行的相电压的水平。在此过程中,正常相则会出现电荷释放的物理过程。由于中性点不接地系统中没有其他的泄流通路,自由电荷仅能通过互感器的一次绕组泄往大地。由于自由电荷释放过程的振荡频率偏低,因此在释放过程中极有可能引起 TV 铁心的饱和。具有过饱和铁心的电压互感器,在工频电源电压作用下也将出现很大的冲击电流。泄流电流与工频冲击电流共同作用,则可能造成熔断器熔断。

4 抑制措施

前面的分析表明,攀枝花变电站 35 kV TV 高压侧熔丝熔断可能是由于 35 kV 电网出现单相短路后,正常相的电压在从线电压恢复到相电压的过程中,自由电荷经 TV 高压侧绕组释放并导致 TV 铁心饱和所造成的。根据这一机理,可提出以下两条抑制方法建议:

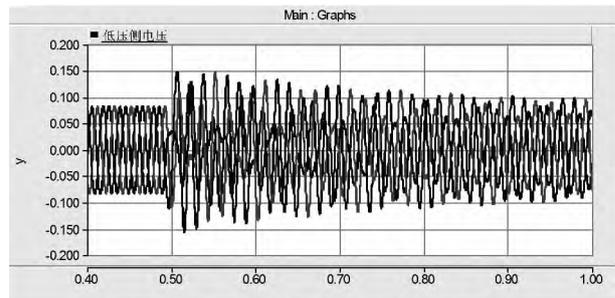
1) 变压器中性点加装消弧线圈

当在变压器中性点加装消弧线圈后,在 35 kV 电网单相故障恢复期间,自由电荷将增加一条释放通道,流经 TV 铁心的自由电荷将明显减小,铁心饱和将得以抑制。因此,利用在变压器中性点加装消弧线圈^[8]可以有效地抑制 35 kV TV 高压侧熔丝的熔断问题。

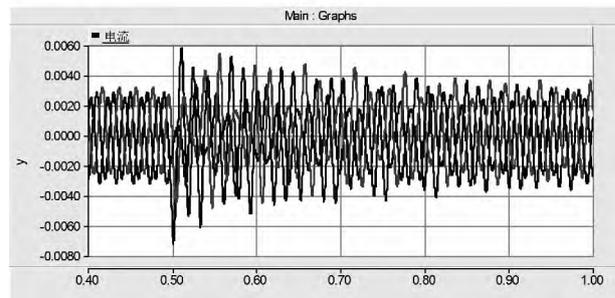
同样利用 PSCAD 仿真软件,对白岩子变电站 35 kV 电网的电磁暂态进行仿真。与前面的仿真工况不同的是,前面模型中在白岩子主变压器 35 kV 侧中性点装设了消弧线圈,而此处则在主变压器 35 kV 侧中性点装设了消弧线圈,线圈电感值刚好实现 35 kV 电网过补偿。依然设置 $t = 0.5$ s 时,35 kV 网络内 C 相出现短时单相接地故障,持续时间 8 ms,接地阻抗 1 000 Ω 。可以得到在熔丝不熔断的情况下,白岩子站 35 kV 母线 TV 二次侧电压与高压侧电流如图 7 所示。

对比图 6 与图 7 可知,系统装设消弧线圈后,由于 C 相单相短路消失后,在 35 kV TV 高压侧产生的电流由 2.0 A 下降至 0.007 A,大幅度地降低了 TV 熔丝熔断的可能性。由此,验证了消弧线圈可以有效抑制 TV 高压侧熔丝熔断的结论。

2) 扰动原因排查



(a) 白岩子站 35kV 母线 TV 二次侧电压



(b) 白岩子站 35kV 母线 TV 高压侧电流

图 7 装设消弧线圈后的仿真结果

由于 TV 高压侧熔丝熔断原因是由于低压侧电网单相短路等扰动造成的,因此,消除扰动则可以在根本上解决 TV 高压侧熔丝熔断的原因。

因此建议,国网攀枝花供电公司对 35 kV、10 kV 电网的绝缘情况进行排查,重点梳理在风偏情况下非绝缘架空线路与周边树木的距离;同时关注雷击、冲击负荷等因素对低压电网电压扰动的影响。

5 结 论

通过对 110 kV 白岩子变电站 7 月 1 日 35 kV TV 高压侧熔丝熔断事件进行分析,得到如下结论:通过录波数据,推断导致 35 kV TV 高压熔断的原因为单相接地短路消失产生在 TV 上的冲击电流。

1) 推导了中性点不接地系统单相短路消失后流过 TV 一次侧的电流值以及磁链的大小,并解释了导致 TV 熔断的原因;

2) 通过算例仿真分析了单相短路接地消失后导致 TV 一次侧电流值增大的现象;

3) 分析了抑制中性点不接地系统单相短路故障消失后 TV 的过流措施,并通过仿真进行了验证。

参考文献

[1] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水力电力出版社, 1985: 253 - 294.

[2] N. Berbic ,A. Nuhanovic ,V. Madzarevic. Analysis of the Insulated Powergrid Transient Behavior after Faulted Phase Tripping [C]. IEEE MELECON 2004: 106 – 109

[3] Yunge Li ,Wei Shi ,Rui Qin ,et al. A Systematical Method for Suppressing Ferroresonance at Neutral – grounded Substations [J]. IEEE Transactions Power Delivery 2003 , 18(3) : 1009 – 1014.

[4] 王季梅. 高压交流熔断器 [M]. 西安: 西安交通大学出版社 ,2000: 60 – 85.

[5] 韩涛. 电磁式 PT 一次侧熔断器熔断原因分析及防治措施的研究 [D]. 保定: 华北电力大学 2006.

[6] J. Tanggawelu ,B. Mukerjee ,R. N. Ariffin. Ferroresonance

Studies in Malaysian Utility’s Distribution Network [C]. Power Engineering Society General Meeting ,2003: 125 – 128.

[7] 许颖. 电力网中性点接地问题 [J]. 电网技术 ,1991 ,15 (3) : 90 – 93.

[8] E. 斯拉麦卡 ,W. 瓦特西 (西德) . 高低压电网中的暂态过程计算原理 [M]. 北京: 机械工业出版社 ,1983: 11 – 20.

作者简介:

陆 强 (1988) , 硕士 , 助理工程师 , 主要从事电力系统稳定分析与控制的研究。

(收稿日期: 2015 – 12 – 04)

(上接第 19 页)

6 结 论

以光伏发电系统工程应用需求出发 ,建立了光伏电池阵列详细数学模型 ,对光伏电池板特性进行了深入研究 ,并建立了直流升压斩波电路、最大功率跟踪算法及三相逆变电路电磁暂态数学模型。对光伏电池板的输出特性和光伏发电系统运行功能进行了稳态和动态过程分析 ,采用 Matlab/Simulink 仿真验证了理论分析的正确性。

参考文献

[1] Kadri R ,Gaubert J P ,Champenois G. An Improved Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Grid – connected Inverter Based on Voltage – oriented Control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics ,2011 ,58 (1) : 66 – 75.

[2] 张艳霞 ,李璇 ,赵杰. 光伏电源最大功率跟踪的改进扰动观察法 [J]. 天津理工大学学报 2013 29(1) : 21 – 24.

[3] 郑颖楠 ,王俊平 ,张霞. 基于动态等效阻抗匹配的光伏发电最大功率点跟踪控制 [J]. 中国电机工程学报 , 2011 31(2) : 111 – 118.

[4] Tat L N ,Kay – Soon L. A Global Maximum Power Point tracking Scheme Employing DIRECT Search Algorithm for Photovoltaic Systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2010 57(10) : 3456 – 3467.

[5] 王晓 ,罗安 ,邓才波 ,等. 基于光伏并网的电能质量控制系统 [J]. 电网技术 2012 36(4) : 68 – 73.

[6] 孙兴 ,张崇巍 ,孙本新. 采用电流寻优的 MPPT 光伏阵列并网逆变器的研究 [J]. 太阳能学报 2001 22(3) : 306 – 310.

[7] 钱军 ,陶梅玉 ,孙智一 ,等. 光伏电站接入电网对电力系

统电压闪变的影响 [J]. 低压电器 2011(22) : 19 – 22.

[8] 陈四雄 ,曾春保. 兆瓦级光伏并网逆变器关键设计技术 [J]. 电力电子技术 2013 47(4) : 64 – 66.

[9] Widen J ,Wackelgard E ,et al. Impacts of Distributed Photovoltaics on Network Voltages: Stochastic Simulations of Three Swedish Low – voltage Distribution Grids [J]. Electric Power Systems Research 2010 80(12) : 1562 – 1571.

[10] 李峰 ,李威 ,薛峰 ,等. 规模化光伏电站与电网暂态交互影响定量分析 [J]. 电网与清洁能源 ,2011 ,27 (11) : 50 – 56.

[11] Villalva M G ,Siqueira T D ,Ruppert E. Voltage Regulation of Photovoltaic Arrays: Small – signal Analysis and Control Design [J]. IET Power Electronics 2010 3(6) : 869 – 880.

[12] 刘莉敏 ,曹志峰 ,许洪华. 50 kW_p 并网光伏示范电站系统设计及运行数据分析 [J]. 太阳能学报 2006 27 (2) : 146 – 151.

[13] 董伟杰 ,白晓民 ,朱宁辉 ,等. 间歇式电源并网环境下电能质量问题研究 [J]. 电网技术 2013 37(5) : 1265 – 1271.

[14] 杨明 ,周林 ,张东霞 ,等. 考虑电网阻抗影响的大型光伏电站并网稳定性分析 [J]. 电工技术学报 2013 28 (9) : 214 – 223.

[15] 陈权 ,李令冬 ,王群京 ,等. 光伏发电并网系统的仿真建模及对配电网电压稳定性影响 [J]. 电工技术学报 2013 28(3) : 241 – 278.

[16] 龙源 ,李国杰 ,程林 ,等. 利用光伏发电系统抑制电网功率振荡的研究 [J]. 电网技术 2006 30(24) : 44 – 49.

[17] Varma R ,Salama M. Large – scale Photovoltaic Solar Power Integration in Transmission and Distribution Networks [C] // Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting ,Detroit 2011.

(收稿日期: 2015 – 12 – 14)