128

云广特高压直流输电负极运行换相失败及控制研究

陈仕龙,束洪春,甄 颖

(昆明理工大学 电力工程学院,云南 昆明 650051)

摘要: 总结直流输电换相失败的判断标准,研究防止继发性换相失败的控制措施。以云广±800 kV 特高压直 流输电负极运行为研究对象,利用输电系统实际参数在 PSCAD/EMTDC 上建立仿真模型,仿真结果表明:减 小变压器变比,逆变器不发生换相失败,当增大变比到 3.52 时,逆变器发生换相失败;三相对称接地短路故障 时换相失败对于故障合闸角没有敏感性,两相短路和单相接地短路在故障合闸角为 90° 和 270° 时最容易引 发逆变器换相失败:接地电阻的大小和故障持续时间对换相失败影响很大。

关键词:特高压输电:高压直流输电;换相失败;仿真;模型;PSCAD/EMTDC;控制系统 中图分类号: TM 711 文献标识码:A

引言 0

云广±800 kV 特高压直流输电是世界上第一条 特高压直流输电工程 西起云南省楚雄州楚雄换流 站,东至广东省广州市穗东换流站,全长1418 km, 额定输送功率 5000 MW, 电压等级 ±800 kV, 额定直 流电流 3.125 kA,目前已经双极试运行^[1]。由于负极 运行在防雷方面的优势,在分期建设时一般采取先负 极投运再建设正极的方式,在双极运行过程中需要 单极运行时也优先考虑负极运行,云广±800 kV 特 高压直流输电也会经常采用负极运行方式。换相失 败是直流输电系统最常见的一种故障,多数情况下 换相失败可以自动恢复,如果发展为继发性的换相 失败,直流系统就会强迫停运^[2]。故对云广±800 kV 特高压直流输电负极运行换相失败进行研究,对云 广特高压直流输电系统安全运行是十分必要的。国 内外学者对高压直流输电系统及特高压直流输电系 统换相失败进行了深入的研究[39]。

本文对高压直流输电换相失败机理、引起换相 失败的原因、换相失败判断标准及抑制换相失败的 控制措施进行研究。采用 PSCAD/EMTDC 仿真程 序,以云广±800 kV 特高压直流输电工程为对象,根 据云广±800 kV 特高压直流输电工程的设计参数, 建立云广±800 kV 特高压直流输电系统负极运行的 精确仿真模型,对云广±800kV 特高压直流输电负极 运行时换相失败进行仿真研究。

特高压直流输电换相失败机理、影响因素 1 及判断标准

特高压直流输电换相失败机理 1.1

换相失败是直流输电最常见的故障之一,在6脉

收稿日期:2012-04-23;修回日期:2013-04-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50977039,51105183, 51267008)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50977039,51105183,51267008)

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.06.024

动换流器中,当2个桥臂之间换相结束后,刚退出导 通的阀在反向电压作用的一段时间内,如果未能恢 复阻断能力,或者在反向电压期间换相过程一直未 能进行完毕,这2种情况在阀电压转变为正向时被 换相的阀都将向原来预定退出导通的阀倒换相,这 称为换相失败[10-11]。

换流器的阀是可控电力电子开关,目前大容量直 流输电工程都采用晶闸管作为换流器的阀开关,晶 闸管需要一定时间完成载流子复合,恢复正向阻断 能力。晶闸管的恢复时间以极限熄弧角 γ_{min} 表示,在 实际运行中,逆变器熄弧角ү小于үш 就认为换相失 败[12-13],这是发生换相失败的本质。

1.2 特高压直流输电换相失败的影响因素

晶闸管去游离恢复时间在 400 µs 左右(约为 7°电角度),考虑到串联元件的误差,晶闸管的恢复 时间以电角度 γ_m 表示约为 10°。所以在实际运行 中,当γ<10°时就认为发生换相失败。受端系统对 称时,逆变器的熄弧角计算公式如下所示:

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sqrt{2} I_d X_c}{U_L / K} + \cos\beta\right)$$
(1)

其中, $I_{\rm d}$ 为直流电流; $X_{\rm c}$ 为换相电抗; $U_{\rm L}$ 为换流母线 线电压有效值;β为触发越前角;K为换流变压器变 比。当系统发生不对称故障时,会使换相线电压过 零点前移一个角度φ,此时逆变器关断角为:

$$Y = \arccos\left(\frac{\sqrt{2} I_{\rm d} X_{\rm C}}{U_{\rm L}/K} + \cos\beta\right) - \phi \qquad (2)$$

由式(2)可见,换相失败的影响因素包括直流电 流、触发越前角、换流母线线电压、换流变压器变比、 换相电抗、换相电压过零点相位移角等[14]。

1.3 特高压直流输电换相失败判断标准

换相失败的本质是熄弧角γ小于极限熄弧角 γ_{mn} 。判断换相失败的最简单、最准确标准应该以其 基本特征为准:熄弧角小于换流阀恢复阻断能力所 对应的时间,即熄弧角 γ 小于极限熄弧角 γ_{min} 。

云广±800 kV 特高压直流输电系统采用单极双 12 脉动换流器串联的主接线方式,单极有4个6脉 动换流阀,任意一个6脉动换流阀发生换相失败都 可认为特高压直流输电系统发生换相失败。所以云 广±800 kV 特高压直流输电系统发生换相失败的判 断标准应为:单极的4个6脉动换流阀中最小的熄 弧角小于极限熄弧角 γmino

2 特高压直流输电换相失败避免措施

避免换相失败的措施可分为换相失败的预防措施和防止继发性换相失败的措施2类^[15]。

2.1 换相失败的预防措施

换相失败的预防措施是指在直流输电系统设计 和运行中采取适当的措施对换相失败故障进行预 防。在直流输电中主要有以下几种换相失败预防措 施:利用无功补偿维持换相电压稳定;采用较大的平 波电抗器限制暂态时直流电流的上升;规划时降低 换流变压器的短路电抗;增大β或γ的整定值;采取适 当的控制方式;改善交流系统的频谱特性;人工换相。

2.2 防止继发性换相失败的措施

逆变器发生换相失败后,不需要马上进行闭锁保 护,采取适当措施可以防止发生继发性换相失败,防 止发生继发性换相失败的措施主要有以下几种:控 制系统中采用低压限流环节(VDCOL);增大换流阀 触发角β;增发触发脉冲,对逆变器一次换相失败故 障的发展进行控制;投入旁通对和将换流阀闭锁对 逆变器2次和多次连续换相失败故障的发展进行控 制;直流系统采用适当的恢复速率。

2.3 云广特高压直流输电控制系统对换相失败的 控制措施

目前,国内外高压直流输电工程控制系统主要有 Siemens 公司的技术和 ABB 公司的技术。Siemens 直 流输电系统根据换相失败的原理来检测,采用了事 后补救的措施,即检测到换相失败后,通过定熄弧角 控制使系统从故障中恢复;而 ABB 直流输电系统的 换相失败相关技术主要采用了预测手段,通过对交流 系统故障的严重程度进行判断,提前采取措施以避 免换相失败。云广特高压直流输电工程控制保护系 统采用的是许继公司成套提供的 DPS-2000A 系统, 采用的是 Siemens 公司的技术。云广特高压直流输 电控制系统对换相失败的控制除在控制系统中采用 VDCOL 外,主要采用转换控制方式的方法来抑制换 相失败,即当出现换相失败时,逆变站的控制方式由 定电压控制转变为定熄弧角控制以抑制换相失败。

3 云广特高压直流输电负极运行系统建模

本文采用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件

建立云广特高压直流输电负极运行的精确仿真模 型。参照云广特高压直流输电系统换流站主接线, 可建立云广±800 kV 特高压直流输电系统负极运 行仿真模型。云广特高压直流输电系统电压等级 为±800 kV,负极运行时直流额定电压为-800 kV,直 流额定功率为 2500 MW, 直流额定电流为 3.125 kA。 整流侧交流系统额定电压为 525 kV,短路比 SCR= 2.5/84°;逆变侧交流系统额定电压为 525 kV,短路比 SCR=2.5/75°。整流侧配置两大组交流滤波器,直流 滤波器的配置为2组三调谐滤波器,逆变侧交直流滤 波器配置及参数同整流侧。整流侧换流变压器采用 三相双绕组变压器,单台容量 750.63 MV·A,接线型式 为 Y₀/Y 及 Y₀/ △ 2 种, 换流阻抗 0.18 p.u., 网侧绕 组额定电压 525 kV, 阀侧绕组额定电压 169.85 kV。 逆变侧换流变压器采用三相双绕组变压器,单台容量 750.63 MV·A, 接线型式为 Y₀/Y 及 Y₀/△2 种, 换流 阻抗 0.18 p.u., 网侧绕组额定电压 525 kV, 阀侧绕组 额定电压 160.5 kV。整流侧平波电抗器为极母线和 中性母线各装设2台75mH的干式平波电抗器,逆 变侧平波电抗器设置及参数与整流侧相同。整流站 和逆变站的换流阀采用 2 个 12 脉动换流单元串联接 线的接线方式.2个12脉动阀组串联电压按-(400+ 400) kV 分配。直流输电线路全长 1 418 km, 沿线 大地电阻率的平均值为 1000 Ω·m.采用了 6×LGL -630/45导线,采用 Frequency Dependent (Phase) Model Options 模型^①。所建立的仿真模型见图 1。

4 云广特高压直流输电负极运行换相失败 及控制仿真

4.1 云广特高压直流输电换流变压器变比 K 增大

由式(2)可见,当其他变量不变时,变压器变比 K 增大将使关断角γ减小,从而导致换相失败。云 广特高压直流输电负极运行时逆变侧换流变压器额 定变比 K=525/160.5=3.271,通过大量的仿真发现: 减小变比 K,逆变器不发生换相失败,当增大变比 K 到 K=525/149=3.52 时,逆变器发生换相失败。云 广特高压直流输电负极运行时换流变压器变比 K= 3.52,仿真波形如图 2—4 所示。

图中 U_d 为直流母线电压; I 为 VDCOL 输出电流的标幺值(后同); γ 为云广特高压直流负极 4 个 6 脉动换流器的最小熄弧角。由仿真结果可见, 当逆变侧换流变压器变比 $K \ge 3.52$ 时, 云广特高压直流周期性地出现负极 4 个 6 脉动换流器的最小熄弧角为 0° 的现象, 小于极限熄弧角 γ_{min} , 即云广特高压直流输电系统负极发生继发性换相失败。换相失败发生后, VDCOL 启动, 逆变侧控制方式由定电压控制方式

① 西南电力设计院.云南至广东±800 kV 特高压直流输电工程楚雄 ±800 kV 换流站新建工程初步设计.2007.



图 1 云广特高压直流输电-800 kV 仿真模型 Fig.1 Simulation model of Yun-Guang -800 kV UHVDC transmission system



图 2 整流侧直流母线电压





图 3 控制系统 VDCOL 输出

Fig.3 VDCOL output of control system



图 4 逆变侧最小熄弧角



转变为定熄弧角控制方式,使系统快速恢复正常,但 过一段时间后换相失败再次发生,如此周期性地发生 换相失败。可见,当云广特高压直流逆变侧换流变压 器变比 K≥3.52 时,逆变器将发生继发性换相失败,即 使云广特高压直流控制系统启动,也不能避免。

4.2 逆变侧交流系统三相接地短路

交流系统三相接地短路为对称性故障,该故障 发生时,不会使换相线电压过零点前移一个角度 φ, 但会使换流母线线电压 U_L降低,逆变器是否发生换 相失败以及换相失败后能否恢复与换相电压降落的 速度与幅值、接地电阻大小及故障持续时间有关^[16]。 通过大量的仿真发现:三相对称接地短路故障对于 故障合闸角不敏感,即发生三相对称接地短路时,故障 发生的时刻对换相失败是否发生及能否迅速恢复基 本没有影响,而接地电阻的大小和故障持续时间对 换相失败影响很大,接地电阻越小,故障持续时间越 长,越容易发生换相失败。对云广特高压直流输电负 极运行时逆变侧交流系统三相接地短路进行仿真, 故障起始时刻为 0.3 s,故障持续时间为 100 ms,通过 大量仿真,得到不发生继发性换相失败的临界接地电 阻为 31.5 Ω,此时交流母线电压降为额定值的 60%, 仿真波形如图 5-8 所示。



图 8 逆变侧最小熄弧角



图中 U_{AC} 为交流母线电压。由仿真结果可见,当 逆变侧交流系统发生三相接地短路,故障持续时 间为 100 ms,不发生继发性换相失败的临界接地电 阻为 31.5 Ω 。当接地电阻小于 31.5 Ω 时,发生换相 失败,VDCOL 启动,逆变侧控制方式由定电压控制 方式转变为定熄弧角控制方式,使系统快速恢复正 常,但过一段时间后换相失败再次发生,即使故障已 经切除,也将连续出现负极 4 个 6 脉动换流器的最 小熄弧角为 0° 的现象,小于极限熄弧角 γ_{min} ,即发生 继发性换相失败,当接地电阻大于等于 31.5 Ω 时, 也发生换相失败,VDCOL 启动,逆变侧控制方式由 定电压控制方式转变为定熄弧角控制方式,使系统 快速恢复正常,直流系统只发生一次负极 4 个 6 脉 动换流器的最小熄弧角为 0° 的现象,小于极限熄弧 角 γ_{min} ,即只发生一次换相失败。

4.3 逆变侧交流系统两相短路

交流系统两相短路为非对称性故障,该故障发 生时,不但会使换相线电压过零点前移一个角度 φ, 还会使换流母线线电压 U_L降低,逆变器很容易发生 换相失败。通过大量的仿真发现:两相短路时换相失 败与接地电阻、故障持续时间、故障合闸角关系密 切,接地电阻越小,故障持续时间越长,越容易发生 换相失败,在线电压相位为 90°和 270°,即故障合闸 角为 90°和 270°时,两相短路最容易引发逆变器换 相失败。对云广特高压直流输电负极运行时逆变侧 交流系统 A、B 两相短路进行仿真,故障合闸角为 90°,故障持续时间为 100 ms,通过大量仿真,得到不 发生继发性换相失败的临界接地电阻为 497 Ω,仿真 波形如图 9—12 所示。

由仿真结果可见,当逆变侧交流系统发生两相 短路,故障持续时间为 100 ms,故障合闸角为 90°, 不发生继发性换相失败的临界接地电阻为 497 Ω。 当接地电阻小于 497 Ω时,发生换相失败,VDCOL 启 动,逆变侧控制方式由定电压控制方式转变为定熄



图 10 整流侧直流母线电压 Fig.10 DC bus voltage at rectifier side





Fig.12 Minimum arc extinction angle at inverter side

弧角控制方式,使系统快速恢复正常,但过一段时间 后换相失败再次发生,即使故障已经切除,也将连续 出现负极 4 个 6 脉动换流器的最小熄弧角为 0° 的 现象,小于极限熄弧角 γ_{min} ,即发生继发性换相失败; 当接地电阻大于等于 497 Ω 时,也发生换相失败, VDCOL 启动,逆变侧控制方式由定电压控制方式转 变为定熄弧角控制方式,使系统快速恢复正常,直流 系统只发生一次负极 4 个 6 脉动换流器的最小熄弧 角为 0° 的现象,小于极限熄弧角 γ_{min} ,即只发生一次 换相失败。

4.4 逆变侧交流系统单相接地短路

交流系统单相接地短路为非对称性故障,该故 障发生时,不但会使换相线电压过零点前移一个角 度 ϕ ,还会使换流母线线电压 U_L 降低,逆变器容易 发生换相失败。通过大量的仿真发现:单相接地短 路时换相失败与接地电阻、故障持续时间、故障合闸 角关系密切,接地电阻越小,故障持续时间越长,越 容易发生换相失败,在接地相电压相位为90°和270°, 即故障合闸角为90°和270°时,单相接地短路最容 易引发逆变器换相失败。对云广特高压直流输电负 极运行时逆变侧交流系统 C 相接地短路进行仿真, 故障合闸角为90°,故障持续时间为100 ms,通过大 量仿真,得到不发生继发性换相失败的临界接地电 阻为168 Ω ,仿真波形如图 13—16 所示。

由仿真结果可见,当逆变侧交流系统发生单相接 地短路,故障持续时间为 100 ms,故障合闸角为 90°, 不发生继发性换相失败的临界接地电阻为 168 Ω。





图 14 整流侧直流母线电压

Fig.14 DC bus voltage at rectifier side



图 15 控制系统 VDCOL 输出

Fig.15 VDCOL output of control system



图 16 逆变侧最小熄弧角

Fig.16 Minimum arc extinction angle at inverter side

当接地电阻小于 168 Ω 时,发生换相失败,VDCOL 启 动,逆变侧控制方式由定电压控制方式转变为定熄 弧角控制方式,使系统快速恢复正常,但过一段时间 后换相失败再次发生,即使故障已经切除,也将连续 出现负极 4 个 6 脉动换流器的最小熄弧角为 0° 的 现象,小于极限熄弧角 γ_{min} ,即发生继发性换相失败; 当接地电阻大于等于 168 Ω 时,也发生换相失败; 当接地电阻大于等于 168 Ω 时,也发生换相失败, VDCOL 启动,逆变侧控制方式由定电压控制方式转 变为定熄弧角控制方式,使系统快速恢复正常,直流 系统只发生一次负极 4 个 6 脉动换流器的最小熄弧 角为 0° 的现象,小于极限熄弧角 γ_{min} ,即只发生一次 换相失败。

5 结论

本文针对云广±800 kV 特高压直流输电负极运 行方式,应用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件建 立了云广特高压直流输电负极运行的仿真模型,并 对云广±800 kV 特高压直流输电负极运行时换流变 压器变比、逆变侧交流系统故障进行仿真。通过本 文的研究,得出如下结论。

a. 云广特高压直流输电负极运行换相的判断标 准为单极的4个6脉动换流阀中最小的熄弧角小于 极限熄弧角 γ_{min}。

b. 在云广特高压直流输电负极运行状态下,不能使逆变侧换流变压器变比 K≥3.52,否则逆变器 将周期性地发生换相失败。

c. 逆变侧交流系统发生三相接地短路时, 换相

失败对故障合闸角(故障发生时刻)不敏感,但与接 地电阻大小和故障持续时间关系密切。

d. 逆变侧交流系统发生两相短路和单相接地短路时,换相失败与短路电阻和接地电阻、故障持续时间、故障合闸角(故障开始时刻)密切相关;对于两相短路,在线电压相位为90°和270°时,两相短路最容易引发逆变器换相失败;对于单相接地短路最容易引发逆变器换相失败。

参考文献:

- [1] 中国南方电网公司. ±800 kV 特高压直流输电技术研究[M]. 北京:中国电力出版社,2006:60-65.
- [2] 荆勇,欧开健,任震.交流单相故障对高压直流输电换相失败的 影响[J].高电压技术,2004,30(3):60-62.
 JING Yong,OU Kaijian,REN Zhen. Analysis on influence of AC single phase faults on HVDC commutation failure[J]. High Voltage Engineering,2004,30(3):60-62.
- [3] 罗隆福,周金萍,李勇,等. HVDC 换相失败典型暂态响应特性及 其抑制措施[J]. 电力自动化设备,2008,28(4):5-9.
 LUO Longfu,ZHOU Jinping,LI Yong, et al. Typical transient response of HVDC commutation failure and its countermeasures
 [J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(4):5-9.
- [4] 慈文斌,刘晓明,刘玉田. ±660 kV 银东直流换相失败仿真分析
 [J]. 电力系统保护与控制,2011,39(12):134-139.
 CI Wenbin,LIU Xiaoming,LIU Yutian. Commutation failure simulations of ±660 kV Yindong-Jiaodong HVDC line[J]. Power System Protection and Control,2011,39(12):134-139.
- [5] 向博,罗隆福,许加柱,等.采用滤波换相换流器的多馈入直流输 电系统中换相失败问题的研究[J].电力自动化设备,2012,32(9): 117-121.

XIANG Bo,LUO Longfu,XU Jiazhu,et al. Commutation failure of multi-infeed HVDC transmission system with FCC[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(9):117-121.

- [6] 吴萍,林伟芳,孙华东,等. 多馈入直流输电系统换相失败机制及 特性[J]. 电网技术,2012,36(5):269-274.
 WU Ping,LIN Weifang,SUN Huadong, et al. Research and electromechanical transient simulation on mechanism of commutation failure in multi-infeed HVDC power transmission system[J].
 Power System Technology,2012,36(5):269-274.
- [7] 张汝莲,赵成勇,卫鹏杰. 直流馈入后交流线路故障对换相失败 瞬态特征的影响[J]. 电力自动化设备,2011,31(7):82-87.
 ZHANG Rulian,ZHAO Chengyong,WEI Pengjie. Influence of AC line faults on HVDC commutation failure transient characteristics in DC/AC interconnected power grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(7):82-87.
- [8] 李新年,易俊,李柏青,等. 直流输电系统换相失败仿真分析及运行情况统计[J]. 电网技术,2012,36(6):265-271.
 LI Xinnian,YI Jun,LI Baiqing, et al. Simulation analysis and operation statistics of commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Technology,2012,36(6):265-271.
- [9]李晓华,刘洋,蔡泽祥.直流输电换流变压器阀侧交流单相接地 故障[J].电工技术学报,2012,27(6):38-45.

LI Xiaohua, LIU Yang, CAI Zexiang. Analysis of grounding fault

132

133

at HVDC converter transformer valve side [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6):38-45.

- [10] 浙江大学发电教研组直流输电科研组. 直流输电[M]. 北京:中国电力工业出版社,2004:110-120.
- [11] 李兴源. 高压直流输电系统的运行与控制[M]. 北京:科学出版 社,1998:193-194.
- [12] 陈文滨,严兵,张尧,等. 基于 EMTDC 的 UHVDC 交流侧故障的 仿真[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(11):15-18.
 CHEN Wenbin,YAN Bing,ZHANG Yao,et al. Simulation of fault in UHVDC AC side based on EMTDC[J]. Power System Protection and Control,2009,37(11):15-18.
- [13] THIO C V, DAVIES J B, KENT K L. Commutation failures in HVDC transmission systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2):946-957.
- [14] 欧开健,任震,荆勇. 直流输电系统换相失败的研究(一)——换相失败的影响因素分析[J]. 电力自动化设备,2003,23(5):5-8.
 OU Kaijian,REN Zhen,JING Yong. Research on commutation failure in HVDC transmission system, part 1:commutation failure factors analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003,23(5):5-8.
- [15] 任震,欧开健,荆勇. 直流输电系统换相失败的研究(二)——避

免换相失败的措施[J]. 电力自动化设备,2003,23(6):6-9.

REN Zhen,OU Kaijian,JING Yong. Research on commutation failure in HVDC transmission system,part 2:measures against commutation failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003,23(6):6-9.

[16] 郑传材,黄立滨,管霖,等. ±800kV 特高压直流换相失败的 RTDS 仿真及后续控制保护特性研究[J]. 电网技术,2011,35(4): 14-20.

ZHENG Chuancai, HUANG Libin, GUAN Lin, et al. RTDSbased simulation of commutation failure in ± 800 kV DC power transmission and research on characteristics of subsequent control and protection [J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 14-20.

作者简介:

陈仕龙(1973-),男,四川汉源人,讲师,博士研究生,研究 方向为高压直流输电(E-mail:chenshilong3@126.com);

束洪春(1961-),男,江苏丹阳人,教授,博士研究生导师, 博士,主要研究方向为电力信号处理、电力系统新型继电保护 与故障测距等。

Commutation failure of Yun-Guang UHVDC transmission system running in negative pole state and its control measures

CHEN Shilong, SHU Hongchun, ZHEN Ying

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

Abstract: The causes of commutation failure in UHVDC transmission system are analysed, its criterion is summarized and the control measures against the consequential commutation failure are studied. The simulation model of Yun-Guang ± 800 kV UHVDC transmission system with its actual parameters is built on PSCAD/EMTDC. The simulative results show that, the decrease of transformer ratio will not induce the commutation failure of inverter while its increase up to 3.52 will do; the commutation failure is not sensitive to the fault close angle for symmetrical three-phase grounding fault while it is sensitive to the fault close angle for two-phase short circuit fault and single-phase grounding fault, and the commutation failure occurs easily when the fault close angle is 90° or 270°; the grounding resistance and fault duration time have great influence on commutation failure.

Key words: UHV power transmission; HVDC power transmission; commutation failure; computer simulation; models; PSCAD/EMTDC; control systems

(上接第 107 页 continued from page 107)

Power transformer condition assessment based on AHP grey fixed-weight clustering

LIU Congfa¹, LUO Richeng¹, LEI Chunyan², WANG Feifei¹, WU Ying¹, JIANG Qiong¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha

410014, China; 2. China Huadian Sichuan Guang'an Power Generation Co., Ltd., Guang'an 638000, China)

Abstract: Aiming at the incompleteness of operational condition information of power transformer, AHP (Analytic Hierarchy Process) method is applied to establish and quantify the level index of transformer condition assessment for its optimization. A grey fixed-weight clustering algorithm is introduced to classify the power transformer conditions and establish the whitening weight function of grey. The combination of AHP and grey fixed-weight clustering algorithm can assess the transformer condition more accurately, qualitatively and quantitatively. Practical case study shows that, the proposed method is reasonable and feasible.

Key words: power transformers; AHP; grey fixed-weight clustering; condition assessment; models; clustering algorithms