最佳重合闸方案的研究

周德才, 张保会, 赵慧梅

(西安交通大学电气工程学院,陕西 西安 710049)

摘要: 提出了最佳重合闸方案。该方案在单相接地短路时跳开单相,两相接地短路时跳开两相,两相不接地短路时只跳开一故障相;瞬时故障时在最佳重合时刻分相重合,永久故障时闭锁重合闸。计算结果表明,该重合闸方案能够避免重合于永久故障时对系统的冲击,增强故障持续期间系统之间的联系,提高电力系统稳定性;并且减小功角摇摆幅度30%和发电机轴系扭振50%以上,也降低了操作过电压。

关键词: 最佳重合闸; 电力系统稳定; 轴系扭振; 过电压

中图分类号: TM762.2 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-4897(2005)01-0028-06

0 前言

自动重合闸技术作为保证系统安全稳定运行的一项重要措施,在国内外电力系统中得到了极为广泛的应用。目前国内的线路重合闸方式,多数仍采用传统的单相重合闸、三相重合闸和综合重合闸方式。

由于高压线路传送容量非常大,重合于永久故障,尤其是严重故障时,对系统造成的影响相当大,甚至会导致系统的瓦解。且现场的自动重合闸采用经固定延时启动断路器,并没有考虑到什么时间重合对系统暂态稳定最为有利,故有可能使得不重合是稳定的系统,由于不恰当的重合时机而变得不稳定。特别是随着电力技术的发展、传输容量的增加,越来越需要解决传统重合闸盲目重合的问题。

长期以来,针对传统重合闸的不利影响,广大学者从不同角度进行了研究。目前,基于永久故障与瞬时故障判别的单相自适应重合闸研究,已取得了实用化的判据,并研制出相应的装置[1,2],对自适应分相重合闸与自适应三相重合闸的研究也取得了很大的进展[3,4]。基于不同重合时刻对电力系统暂态稳定的影响,提出了最佳重合闸时刻[5~8]为最后一次网络操作结束以后,对应最终网络拓扑下稳定平衡点的系统暂态能量最小的时刻;并在此基础上提出了实时捕捉最佳重合时机的实现方法。基于不同重合闸方式对汽轮发电机组轴系扭振的影响,研究[9~11]认为,三相重合闸在重合于高压线出口附近的三相短路及两相接地短路时,有可能一次就足以耗尽发电机组扭振的全部疲劳寿命。为了避免重合于永久故障时对机组轴系造成较大的冲击,应尽量避免采用三相重合闸,而建议采用分相重合闸。

然而,以上的研究均局限于重合闸的某一个方面,对于如何将目前已经成熟的最佳重合时间、自适应判别方法与分相重合闸技术推广运用,构建新型重合闸方案,至今尚无明确的方案。本文试图在现有研究成果的基础上,根据重合闸安装在系统中的不同位置及不同实现条件,提出几种可行的重合闸方案,为重合闸新技术的推广应用和新型重合闸装置的研制提供一些有意义的依据。

本文在现有研究成果的基础上,提出最佳重合闸方案,并对该方案的具体实现做了进一步的讨论;针对该方案对电力系统稳定性、汽轮发电机轴系扭振及系统过电压的影响做了仿真计算。结果表明,该方案具有传统重合闸方式无法比拟的优越性。

1 最佳重合闸方案

1.1 最佳重合闸方案重合方式

①单相接地短路时,跳开单相,然后判断故障类型。永久性故障则三相跳闸不再重合;瞬时性故障,则按瞬时性故障条件下的最佳重合时刻重合,重合不成功再跳开三相。

②两相接地短路时,跳开两故障相,然后根据断开相电容耦合电压判别故障类型。若是永久故障,则三相跳闸不再重合;若是瞬时故障,则按瞬时故障条件下的最佳重合时刻分相重合,重合不成功再跳开三相。

③两相不接地短路时,跳开两故障相中的一相,然后根据两故障相电压相等与否判别故障是否为永久故障。若是永久故障则三相跳闸;若是瞬时

基金项目: 博士点基金资助项目(2002068q027),许继奖教金资助项目

故障,则按瞬时故障条件下的最佳重合时刻重合,重合不成功再跳开三相。

④三相短路(接地与不接地),均跳开三相,按永久故障条件下的最佳重合时刻,分相重合闸,任意一相重合不成功则三相跳闸。

⑤当用于同杆双回线并且发生跨线故障时,跳开故障相,然后按永久故障条件下最佳重合时刻分相重合闸。任意一相重合不成功则三相跳闸,不再重合。若是三相对称的跨线永久故障,则保留准三相运行。

与传统的单相、三相、综合重合闸方式相比,该重合闸方案采用只跳故障相的方式,譬如两相接地短路时跳两相,而两相不接地时只跳其中一相,使得故障时系统联系更加紧密。而且,重合闸功能合理分配在线路保护与断路器保护之中,充分利用线路保护的信息,实现永久故障与瞬时故障的判别。采用分相顺序重合策略,避免了重合于多相永久故障对系统造成的冲击。

1.2　最佳重合闸方案的实现

在该最佳重合闸方式下,重合闸与继电保护配合流程如图1所示。继电保护作出区内故障的判别后,尚需要给出故障类别及故障相别的判断,然后重合闸操作箱发出相应的跳闸与合闸命令。首次跳闸后的重合闸逻辑由保护的CPU计算安排,而分相重合闸的合闸顺序与重合闸时机的捕捉由重合闸的CPU计算安排,最后均由操作箱执行。各框意义简述如下。

1.2.1　自适应判别原理的应用

单相接地短路跳开故障相后,永久性故障时断开相两端电压持续较低,瞬时性故障时断开相两端电压持续较高。据此可以构成识别瞬时故障和永久故障的电压补偿判据,当满足式(1)时,判为瞬时故障允许重合,否则三相跳闸并闭锁重合闸。U_{fault}为断开相的测量电压,$U_l = 3I_0 Z_m$为最大负载条件下两相运行时故障相单位长度的感应电压,Z_m为单位长度线路的相间互感抗;K_k为可靠系数,一般为1.1～1.2,L为线路全长。该原理详细叙述请参见文献[1]。

$$\left| U_{\mathrm{fault}} - \frac{L}{2} U_l \right| \geq \left| \frac{K_k L}{2} U_l \right| \qquad (1)$$

两相接地短路跳开两故障相后,断开相两端的电容耦合电压在瞬时故障时比永久故障时大。据此可以构成电压判据

$$\left| U_{\mathrm{fault}} - U_{xl} \right| \geq K_k U_{zd} \qquad (2)$$

当满足该判据时判为瞬时故障允许重合,反之则三相跳闸并闭锁重合闸。上式U_{fault}中断开相的测量电压,U_{xl}健全相根据故障距离形成对故障相的感应电压,根据线路的互感、故障距离以及健全相电流算出。例如发生ⅠBCG故障时对故障相B的感应电压为$U_{xl} = \alpha L I_A Z_m$。$U_{zd}$为门槛值,可根据运行条

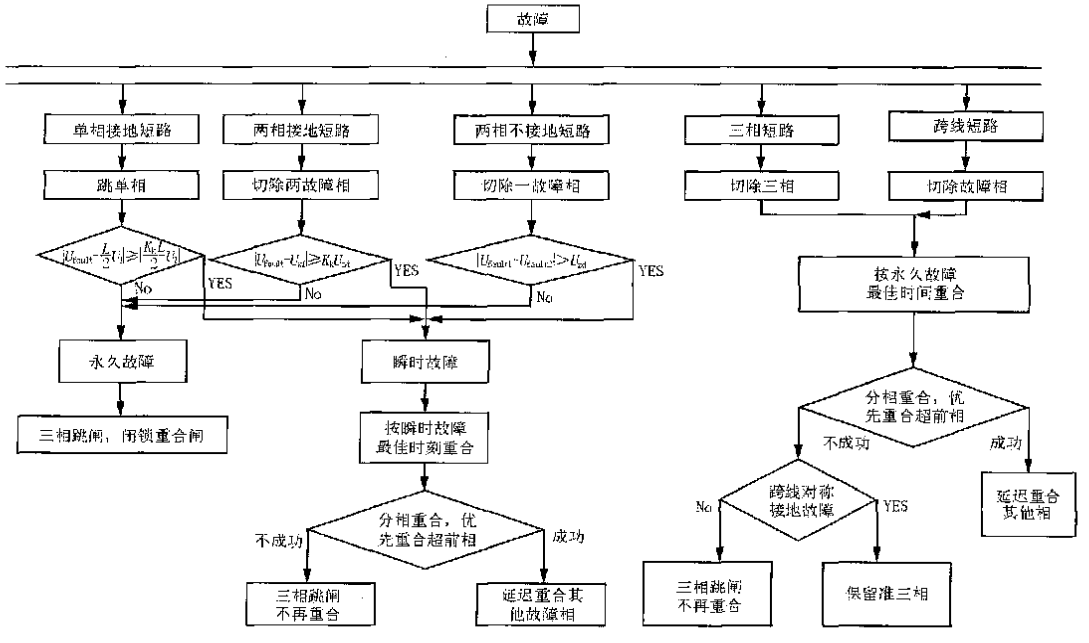

图1　重合闸流程图

Fig. 1　Diagram of reclosing

件整定为 0.1～0.12 U_N。K_k 为可靠系数,可整定为 0.8～0.9。该原理详细说明将另文研究,类似原理可参见文献[3,12]。

两相不接地短路,跳开一故障相后短路故障即可消除,因为保留了两相运行,比保留一相更有利于系统稳定。跳开一故障相后,若是永久短路故障则跳开相电压与未被跳开的故障相电压几乎相等;若是瞬时故障则两相电压差别较大。据此可以构成识别瞬时故障与永久故障的电压判据:

$$|U_{fault1} - U_{fault2}| > U_{zd} \quad (3)$$

当满足该判据时,则判为瞬时故障允许重合,反之则闭锁重合闸。上式中 U_{fault1}、U_{fault2} 分别为两故障相两端测量电压,U_{zd} 为门槛值,根据运行条件可整定 0.2～0.3 U_N。

1.2.2 最佳重合闸时刻的机理及捕捉

对于联系薄弱依靠重合闸成功才能维持首摆稳定的系统,瞬时故障切除后重合时间越短,两侧功角摆开越小,且重合于永久性故障后也不稳定。因此,这种结构的系统,重合闸应越快越好。最佳重合时间应根据故障点绝缘强度恢复时间、断路器绝缘介质强度恢复时间与双侧电源线路两侧继电保护跳闸的时间差等因素整定为最小重合时间。

对于故障切除后不重合首摆可以稳定的系统,最佳重合时刻是最后一次网络操作结束以后,对应最终网络拓扑的稳定平衡点系统暂态能量[7]

$$V(\theta,\tilde{\omega}) = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} T_J\tilde{\omega}^2 - \sum_{i=1}^{n} P_i(\theta_i - \theta_{is}) - \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} C_{ij}(\cos\theta_{ij} - \cos\theta_{ijs})] \quad (4)$$

为最小值 $V(\theta_h,\omega_h)$ 的时刻。该最佳重合时刻一般在系统摇摆的第二或第三摆的过程中,大于最小重合时间。瞬时与永久故障时有不同的最佳重合时刻:瞬时故障时,最佳重合时间为功角离平衡点最近的时刻;永久故障时,最佳重合时间为功角角度达到最大并开始减小,角速度达到负向最大值的时刻[5]。瞬时故障时在最佳时刻重合可以进一步减小后续的摇摆,使不重合是稳定的系统变得更加稳定;永久故障时在最佳时刻重合,对系统的冲击最小,不会因为重合于永久故障而失稳。最佳重合时刻可以通过离线计算近似获得[5],简单系统中也可以实时在线捕捉[6]。

1.2.3 分相重合闸方式的优点

由于不同的重合闸方式,决定了最后一次操作结束后网络的拓扑结构,从而影响式(4)中的不平衡功率 C_{ij},以及最后一次网络操作后系统的稳定平衡点 θ_{is} 和 θ_{ijs},最终影响系统的临界稳定能量 V_{cr}。研究表明,采用分相重合闸的方式,不仅能减小发电机轴系扭振,而且还能增强系统之间的联系,增加系统的临界能量,提高系统的稳定裕度。

2 仿真计算

对本文所提出的最佳重合闸进行效益的仿真计算,对于采用瞬时与永久故障识别技术,避免了重合于严重故障,其效益是很显然的,不再列出。下面主要针对最佳重合闸方案的分相重合闸与最佳时刻重合闸技术的效益在对系统稳定性、系统过电压及发电机轴系扭振的影响方面进行仿真计算。在计算中,以 330 kV 同杆双回线路连接的某等值单机无穷大系统为计算模型,考虑了发电机的励磁调节器、调速器作用,负荷采用恒定的阻抗模型。稳态运行时,发电厂出力 65 万 kW。图 2 为系统示意图。

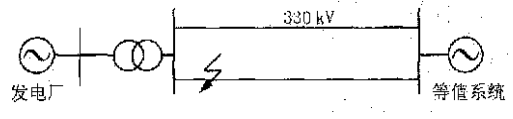

图 2 单机无穷大系统

Fig. 2 Single machine infinite big system

2.1 稳定性计算

当电厂双回线的一回线出口处发生两相接地与不接地短路时,0.1 s 切除故障,固定延时 0.7 s 重合闸,不同重合闸方式对系统稳定影响如表 1 所示。从表 1 可以看到,采用分相重合闸可以减小功角摇摆幅度,提高了系统的稳定性。在分相重合的基础上,进一步考虑在最佳时刻重合,发电机最大摇摆角随重合时间变化如表 2 所示。从表 2 可以看到,此时功角的摇摆幅度将进一步减小 30 %。

表 1 两相短路的功角最大值

Tab. 1 The maximum generator power-angle for two-phase fault

故障类型	重合闸方式	第一摆功角最大值/(°)	第二摆功角最大值/(°)
两相接地短路	三相重合闸	89.39	70.29
	分相重合闸	79.89	63.92
两相不接地短路	三相重合闸	71.10	56.23
	分相重合闸	65.72	51.47

表 2　分相重合闸最佳时间重合发电机功角

Tab. 2　Turbine-generator power angle when reclosing by phase at optimal time

故障类型	重合闸时刻	δ_{min}/(°)	δ_{max}/(°)
单相接地瞬时故障	0.7	26.05	53.57
	1.0	31.19	46.39
两相接地永久性故障	0.7	20.19	67.10
	1.20	24.87	59.08
两相跨线接地瞬时故障	0.7	-8.61	71.31
	1.0	7.46	57.80

2.2　发电机轴系扭振计算

发电机轴系分为六个模块,即高压缸(HP),中压缸(IP),两个低压缸(LPA,LPB),发电机(Gen)和励磁机(EXC)。仿真计算用到的发电机轴系参数取自文献[14]。图 3、图 4、图 5、图 6 分别为 IAIIB 瞬时、永久故障发生时,分别采用最佳重合方案与传统三相重合时,发电机转子同低压缸之间的扭力矩变化曲线。

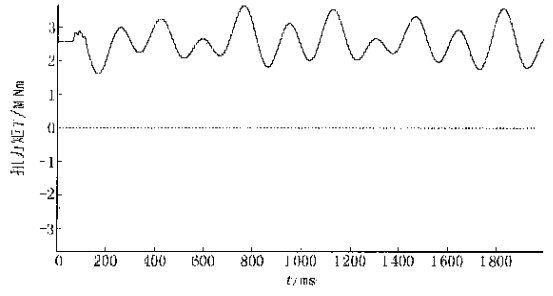

图 3　IAIIB 瞬时故障分相重合扭力矩

Fig. 3　Torque curve when reclosing by phase for two-phase instantaneous fault

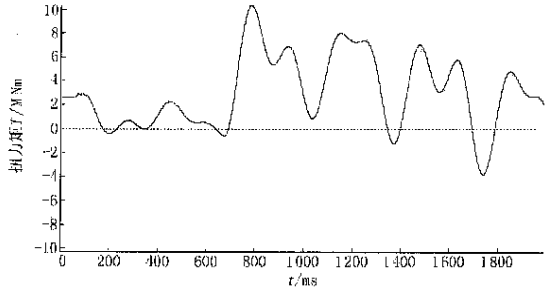

图 4　IAIIB 瞬时故障三相重合扭力矩

Fig. 4　Torque curve when reclsoing by three phases for two-phase instantaneous fault

由图可知,单相跨线瞬时故障时,三相重合发电机转子和低压缸之间的扭力矩最大值 10.07 MNm,而分相重合仅仅为 3.36 MNm;永久故障时,三相重合最大值为 6.634 MNm,而分相重合仅仅为 3.23 MNm。从而可知:相对于传统的重合闸方式,分相重合闸能有效地降低轴系扭振 50 %以上。因此,对于能够经受传统重合闸方式对机组轴系冲击的发电机,采用分相重合闸技术无疑也是足够安全的。

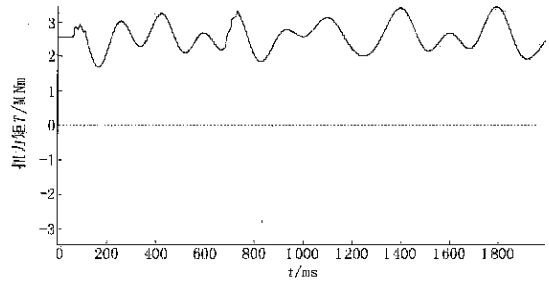

图 5　IAIIB 永久故障分相重合扭力矩

Fig. 5　Torque curve when reclosing by phase for two-phase permanent fault

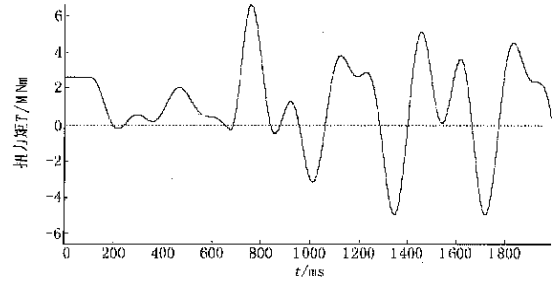

图 6　IAIIB 永久故障三相重合扭力矩

Fig. 6　Torque curve when reclsoing by three phases for two-phase permanent fault

进一步研究发现,对系统暂态稳定最为有利的"最佳重合时刻"在秒数量级;而对轴系扭振最为有利的"理想重合闸时刻"在毫秒数量级。因此,如果按"最佳重合时刻"重合,不会产生比传统重合闸方式更严重的轴系扭振。

2.3　过电压计算

在分别采用最佳重合方案与三相重合情况下,不同类型故障过电压的计算。基准电压为相电压的幅值,即 $U_B = 363 \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 296.4$ kV。

从表 3 可以看出,最佳重合闸降低了操作过电压水平,其操作过电压明显低于三相重合闸方式。

2.4　跨线故障保留准三相运行

发生跨线永久故障 ⅡBCⅡA 时,三相重合闸方式下最后将切除双回线路,导致系统解列;进一步仿真计算表明:若只是保留 ⅠC、ⅠB 两相运行,传输的功率极限约为 300 MW;若两回线采用 L1 跳开 A 相,L2 跳开 B、C 两相,并且判定永久故障时不再重合,则系统之间仍保持有 ⅡBCⅡA 准三相运行,则传输的功

率极限可达 350 MW,并且发电厂侧出口母线的负序电流峰值减少为前者的 0.6 倍。因此,在同杆双回线跨线永久故障能保留准三相运行时,对于提高系统稳定性方面无疑是很有意义的。

表 3 跨线故障分相重合过电压最大值

Tab.3 The maximum over-voltage when reclosing by phase for double-line faults

故障类型	重合闸方式	操作过电压最大值/p.u.
IAIIB 瞬时故障	最佳重合闸	1.311
	三相重合闸	1.525
IAIIB 永久故障	最佳重合闸	1.233
	三相重合闸	1.90
IAIIBC 瞬时故障	最佳重合闸	1.19
	三相重合闸	1.468
IAIIBC 永久故障	最佳重合闸	1.055
	三相重合闸	1.48

3 结论

本文通过对电力系统自动重合闸研究现状分析,利用现有的最佳重合时间、自适应与分相重合闸技术,提出了最佳重合闸方案,并对该方案的实现作了进一步的分析和仿真计算。计算结果表明:该重合闸方案能够增强故障期间系统之间的联系,避免重合于永久故障对系统造成的冲击,提高电力系统稳定性,同时还能减小发电机轴系扭振,并且不会引起超出允许范围的过电压,具有传统的重合闸方式无法比拟的优越性。

参考文献:

[1] 葛耀中.在单相自动重合闸过程中判别瞬时故障和永久故障的方法[J].西安交通大学学报,1984,18(2):23-31.

GE Yao-zhong. Method of Discirminating between Instantaneous Fault and Permanent Fault during Single-phase Autoreclose [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,1984,18(2):23-31.

[2] 葛耀中.微机式自适应单相重合闸的判据和算法[J].继电器,1995,23(2):7-9.

GE Yao-zhong. Criterion of Computer-based Self-adaptive Single-phase Reclosure and Its Simulation Calculation [J]. Relay, 1995,23(2):7-9.

[3] 黄莹,葛耀中.自适应分相重合闸的判据及其仿真计算[J].继电器,1996,24(5):4-8.

HUANG Ying, GE Yao-zhong. Criterion of Adaptive Sequential Reclosure and Its Simulation Calculation [J]. Relay, 1996, 24(5):4-8.

[4] 袁越,葛耀中,张保会.自适应分相重合闸对机组轴系扭振和系统暂态稳定影响的研究[J]. 电力系统自动化,1997,21(5):19-22.

YUAN Yue, GE Yao-zhong, ZHANG Bao-hui. Effect of Adaptive Sequential Reclosure on Shaft Torsional Oscillation and Power System Transient Stability[J]. Automation of Electric Power Systems,1997,21(5):19-22.

[5] 张保会,袁越,薄志谦.最佳重合时间及其整定计算[J].中国电力,1995,28(2):12-16.

ZHANG Bao-hui, YUAN Yue, BO Zhi-qian. Optimal Reclosing Time and Its Setting Calculation[J]. Electric Power,1995,28(2):12-16.

[6] 张保会,康小宁,薄志谦.发电厂送出线重合闸时机的优选与捕捉[J].中国电机工程学报,1995,15(3):173-178.

ZHANG Bao-hui, KANG Xiao-ning, BO Zhi-qian. Optimal Autoreclosure and Its Application Technique[J]. Proceedings of the CSEE,1995,15(3):173-178.

[7] 袁宇春,张保会,钱国明.多机电力系统中重合闸最佳时刻的研究(一)瞬时性故障最佳重合闸时刻的研究[J].电力系统自动化,1998,22(4):16-18.

YUAN Yu-chun, ZHANG Bao-hui, QIAN Guo-ming. Study on the Optimal Reclosing Time in Multi - machine Power System; Part One Study on the Optimal Reclosing Time at Instantaneous Fault[J]. Automation of Electric Power Systems,1998, 22(4):16-18.

[8] 袁宇春,张保会,阎海山.多机电力系统中重合闸最佳时刻的研究(二)永久性故障最佳重合闸时刻的研究[J].电力系统自动化,1998,22(6):46-48.

YUAN Yu-chun, ZHANG Bao-hui, YAN Hai-shan. Study on the Optimal Reclosing Time in Multi-machine Power System; Part Two Study on the Optimal Reclosing Time at Permanent Fault [J]. Automation of Electric Power Systems,1998,22(6):46-48.

[9] Joce J S, Kulig T, Lambrecht D. The Impact of High - speed Reclosing of Single and Multiphase System Faults on Turbine-generator Shaft Torsional Fatigue[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Sysems, 1980,99(1):279-291.

[10]张保会,余颖辉.电气操作对机组轴系扭振的影响机理[J].中国电机工程学报,2001,21(8):24-29.

ZHANG Bao-hui, YU Ying-hui. Analysis for the Effect of Electrical Operation on Turbine-Generator Shaft Torsional Oscillation [J]. Proceedings of the CSEE,2001,21(8):24-29.

[11]张保会,余颖辉.重合时刻对机组轴系扭振的影响,中国电机工程学报,2001,21(9):5-9.

ZHANG Bao-hui, YU Ying-hui. Study on the Effect of Reclosing Time on Turbine-Generator Shaft Torsional Oscillation [J]. Proceedings of the CSEE,2001,21(9):5-9.

[12]四川省电力公司,南京南瑞继保电气公司.同杆双回输

电线路自适应重合闸的研究[Z]. 2002.
Sichuan Electric Power Dispatch Center, Nanjing NARI-RELAYS Electric Co., Ltd. Research on Self-adaptive Auto-reclosing for Parallel Transmission Lines[Z]. 2002.
[13] Zhang B H, Yuan Y C, Chen Z, et al. Bo Computation of Optimal Reclosure Time for Transmission Lines [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(8): 670-675.
[14] IEEE Subsynchronous Resonance Task Force of the Dynamic System Performance Working Group, Power System Engineering Committee. First Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance [J]. IEEE Trans, 1977, PAS-96(5): 1565-1572.

收稿日期: 2004-04-29; **修回日期**: 2004-06-24

作者简介:

周德才(1980 -),男,硕士研究生,研究方向为新型继电保护; E-mail: zhoudecai@21cn.com

张保会(1953 -),男,教授,博士研究生导师,主要研究电力系统安全稳定紧急控制、新型继电保护、电力系统自动化和电力系统通信;

赵慧梅(1980 -),女,硕士研究生,研究方向为新型继电保护。

Study of a scheme of optimal auto-reclosing

ZHOU De-cai, ZHANG Bao-hui, ZHAO Hui-mei
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A scheme of optimal auto-reclosing is proposed in this paper. Single phase is tripped for single-phase-earth-fault, two phases are tripped for two-phase-earth-fault and either fault phase is tripped for two-phase unearth fault in the scheme. Further more, the switches reclose at optimal reclosing time by phase for instantaneous fault and shut down reclosure for permanent fault. The calculation result shows that the reclosing mode can avoid severe impact to the system caused by reclosing on permanent fault, strengthen the inter-connection between systems during the fault, and improve the stability of power system. Besides, power angle and the generator shaft torsional oscillation can be alleviated by 30 percent and by more than 50 percent respectively. And the over-voltage generated from the reclosing mode is reduced as well.

The project is supported by Research Fund for the Doctoral Programme of Higher Education (No. 2002689027) and XJ Bounty of China Electricity Fund.

Key words: optimal auto-reclosing; stability of power system; shaft torsional oscillation; over-voltage

国家拟对可再生能源发电实行分类电价

根据我国电价改革的实际情况和促进可再生能源开发利用的要求,并借鉴国际经验,首次提请十届全国人大常委会第十三次会议审议的可再生能源法草案规定,对可再生能源发电实行分类上网电价制度,即按照风力发电、太阳能发电、小水电、生物质能发电等不同的技术类型和成本水平,确定不同的上网电价。

全国人大环境与资源保护委员会主任委员毛如柏就可再生能源法草案作说明时表示,明确规定电网企业要为可再生能源电力上网提供便利,并全额收购符合标准的可再生能源电量,是使可再生能源电力企业得以生存,并逐步提高能源市场竞争力的重要措施。为此,草案规定,国家鼓励和支持可再生能源并网发电,电网企业应当全额收购其电网覆盖范围内经核准或者备案的可再生能源并网发电项目的上网电量。

合理的价格机制是引导可再生能源开发利用的关键。草案规定,国家对可再生能源发电实行分类上网电价制度。分类上网电价由国务院价格主管部门根据不同类型可再生能源发电的特点,按照有利于可再生能源发展的原则测算确定,并定期向社会公告。

此外,考虑到现阶段可再生能源开发利用的投资成本比较高,为加快技术开发和市场形成,尚需要国家给予必要的扶持。草案分别就设立可再生能源发展专项资金、为可再生能源开发利用项目提供财政贴息贷款,对列入可再生能源产业发展指导目录的项目提供税收优惠等扶持措施作了规定。