

新型发电机失磁保护加速判据研究

隋佳音, 毕天姝, 薛安成, 杨奇逊

(华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京 102206)

摘要: 针对现有发电机失磁保护中励磁电压不易获取和动作延时较长等主要缺陷, 提出了基于同步电动势 E_q 的发电机失磁保护加速判据。在加速判据中使用同步电动势取代传统的励磁电压, 无需获取励磁侧电气量, 且加速判据性能可靠, 可有效区分失磁、有励磁振荡、短路故障或其他异常运行方式, 从而大大提高了发电机失磁保护的速动性和选择性, 解决了失磁保护长期以来不能同时满足速动性和选择性的困扰。通过 PSCAD/EMTDC 仿真验证了上述结论的正确性。

关键词: 发电机; 失磁保护; 加速判据; 同步电动势; 功角

A novel accelerated criterion for loss of field protection

SUI Jia-yin, BI Tian-shu, XUE An-cheng, YANG Qi-xun

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Traditional loss of field protection can not measure exciting voltage easily and causes long time delay, thus a new accelerated criterion based on the synchronous electromotive force E_q is proposed. It adopts synchronous electromotive force instead of traditional exciting voltage, dispenses with the excitation side electrical quantity, performs reliably and can distinguish the loss of field from the oscillation, short circuit fault and other abnormal conditions, which improves the rapidity and selectivity greatly, and solves the long term problem that loss of field protection can not meet the requirements of rapidity and selectivity at the same time. PSCAD/EMTDC simulation verifies the correctness of the above conclusion.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50607005).

Key words: generator; loss of field protection; accelerated criterion; synchronous electromotive force; rotor angle

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0069-05

0 引言

大型发电机组安全运行对保证电网正常运行至关重要。励磁系统是发电机和电力系统运行与控制的重要设备。随着其功能的不断完善, 它的结构也日趋复杂, 增加了低励或失磁故障的发生率。低励或失磁后, 发电机各电气参数发生一定程度的振荡, 甚至会破坏电力系统的稳定运行, 并威胁发电机本身的安全^[1]。因此, 加强失磁保护研究, 找到合理和可靠的判据是十分必要的。

现有的失磁保护是把主辅判据通过一定的逻辑关系组合起来实现优势互补, 使误动概率减小到最低程度^[2-5]。但无论如何优化组合, 为了区分失磁和有励磁振荡, 要同时利用变励磁电压辅助判据和延

时实现。由于励磁电压在发电机非正常状态下波动范围大, 数值高, 难以获取, 也不利于继电保护装置的正常运行; 又由于我国电网结构日益紧密, 振荡周期变长, 导致失磁保护延时较长, 不利于快速排除故障。

鉴于现有保护判据的不足, 文献[6]提出采用发电机功角作为主判据, 虽提高了保护的选择性, 却牺牲保护的速动性。文献[7-8]提出基于发电机功率变化量的辅助加速判据, 但由于发电机功率与发电机参数、系统参数和失磁故障形式有关, 阈值整定困难。文献[9-10]认为同步电动势作为主判据可以提高保护的快速性, 但能否与其他异常状态相区分还有待于进一步的研究, 不能完全保证保护的选择性。

目前, 国内100 MW以上的大型发电机组多装设了同步相量测量单元(PMU), 它能够在统一时间坐标下实现发电机功角的在线测量, 为研究失磁保护提出了新的思路。本文提出在实测功角的基础

基金项目: 国家自然科学基金项目(50607005); 自然科学基金重大国际合作项目(50920105705)

上利用同步电动势作为加速辅助判据，取代常规的励磁判据，与现有主判据有机结合，提出一种新型失磁保护配置方案，分析了此方案在发生短路、振荡等异常工况时的动作特性，通过PSCAD/EMTDC仿真验证了这种新型的失磁保护配置能够有效提高发电机失磁保护的速动性和选择性。

1 现有失磁保护判据的缺陷

失磁保护是针对发电机在运行当中由于某种原因失去外施励磁电流的一种保护。主要包括主判据和辅助判据。

1.1 主判据

主要是由机端测量阻抗构成的静稳极限阻抗圆和异步阻抗圆等，用于区分失磁与正常运行状况。机端阻抗判据性能稳定，作为低励、失磁保护的主判据。但由于在系统发生短路、有励磁振荡时也会使机端阻抗轨迹进入到静稳极限阻抗圆或异步阻抗圆，所以要采用辅助判据闭锁。

1.2 辅助判据

常用的辅助判据有：等励磁电压、变励磁电压和负序分量等。其中闭锁性能较好的是变励磁电压^[11]。但变励磁电压判据仍存在以下缺陷：

- 1) 无刷励磁无法获得励磁电压。
- 2) 励磁电压与有功功率的整定比较困难。
- 3) 不反应转子线圈断线故障，如滑环故障或接触不良。

4) 系统振荡及失磁后的异步运行中，励磁电压会有很大的波动。

5) 励磁电压是多变参数，从空载到强行励磁变化幅度大、数值高，不利于保护装置的正常运行。

此外，在发生有励磁振荡时，变励磁电压不能完全可靠地防止保护装置误动作。要保证装置的选择性，必须同时运用变励磁电压判据和延时两种闭锁方式，导致失磁保护都要延时动作，不利于电力系统稳定运行和发电机本身的安全。

2 等有功过程 E_q 的变化规律

在发生有励磁振荡时，由于励磁机强励的作用，励磁侧电压、电流将增加；而发电机发生失磁故障后，到失去静态稳定前的等有功过程中，励磁电流将减小，这是失磁与有励磁振荡的根本区别。励磁电流所产生的磁链在定子绕组中产生定子同步电动势 E_q ， E_q 是在定子侧直接反映励磁电流变化的物理量，用它作辅助判据，可以取代励磁电压判据。

下面推导失磁后 E_q 的变化规律。图 1 所示为一单机无穷大母线系统，设无穷大母线电压是 U_x ， x_s

是系统联系电抗， δ 是功角。由励磁侧磁链方程得：

$$p\psi_f = u_f - r_f i_f, \quad \text{两边同乘 } \frac{x_{ad}}{x_f} \times \frac{x_f}{r_f} \text{ 得:}$$

$$T'_{d0} pE'_q = E_f - E_q \quad (1)$$

其中： E'_q 是瞬变电动势，与励磁绕组磁链成正比； E_f 是定子励磁电动势，与励磁电压成正比； u_f 是励磁电压； i_f 是励磁电流； x_f 是励磁自感抗； r_f 是励磁电阻； x_{ad} 是电枢反应电抗。 T'_{d0} 是开路暂态时间常数，满足 $T'_{d0} = x_f / r_f$ 。

$$E'_q = E_q - (x_d - x'_d) i_d \quad (2)$$

$$i_d = \frac{E_q - U_x \cos \delta}{x_d + x_s} \quad (3)$$

将式 (2)、(3) 代入式 (1) 可导出 E_q 的微分方程：

$$T'_d \frac{dE_q}{dt} + E_q = E_f - (T'_{d0} - T'_d) U_x \frac{d \cos \delta}{dt} \quad (4)$$

其中， T'_d 是短路暂态时间常数，满足 $T'_d = T'_{d0} \frac{x'_d \Sigma}{x_d \Sigma}$ 。

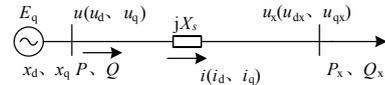


图 1 单机无穷大系统网络

Fig.1 One machine to infinite bus system

1) 若励磁回路突然发生短路，即 $E_f=0$ ，解式 (4) 可得：

$$E_q = E_0 e^{-t/T'_d} + E_s$$

其中： E_0 是正常运行时的定子电动势； E_s 是由于转差产生的滑差电动势。

$$E_s = (T'_d - T'_{d0}) U_x (s \cdot \sin \delta + T'_d s^2 \cdot \cos \delta)$$

2) 若励磁电压按时间常数 T 衰减到 0，即 $E_f=E_0 e^{-t/T}$ 时可得：

$$E_q = E_0 \left(\frac{T}{T - T'_d} e^{-t/T} - \frac{T'_d}{T - T'_d} e^{-t/T'_d} \right) + E_s$$

3) 若发生低励，励磁电压按时间常数 T 衰减到 E_∞ ，即 $E_f=(E_0 - E_\infty) e^{-t/T} + E_\infty$ ，得：

$$E_q = \frac{T}{T - T'_d} (E_0 - E_\infty) e^{-t/T} -$$

$$\frac{T'_d}{T - T'_d} (E_0 - E_\infty) e^{-t/T'_d} + E_\infty + E_s$$

由于励磁系统的环节多，故障类型各异，故障

后形成的故障回路也有差别。由上面的分析总结出各类故障时 E_q 的一般表达式, 形式如式 (5):

$$E_q = (1-\eta)E_0(\alpha e^{-t/T_\alpha} + \beta e^{-t/T_\beta} + \dots) + \eta E_0 + E_s \quad (5)$$

其中 α 、 β 、 η 、 T_α 、 T_β 取决于具体的失磁故障类型和失磁深度, 满足 $\alpha+\beta+\dots=1$, $0<\eta<1$ 。

式 (5) 是失磁后 E_q 的变化规律, 在发生失磁的初始阶段, 发电机要经历一个等有功过程, 在等有功阶段, 转差低于 10^{-3} , 可以认为式 (5) 中 $E_s \approx 0$, 于是定子电动势满足式 (6):

$$E_q = (1-\eta)E_0(\alpha e^{-t/T_\alpha} + \beta e^{-t/T_\beta} + \dots) + \eta E_0 \quad (6)$$

其中, 当 $\alpha+\beta+\dots=1$, $0<\eta<1$ 时, 有 $E_q < E_0$ 。而且, 等有功过程持续的时间较长, 一般在 0.8 s 以上^[1], 微机保护可以实现电气量信息的获取。

综上, 在失磁后的等有功阶段, 无论失磁衰减回路是哪个, E_q 总会减小, 变化很稳定。当发生有功励磁失步时, 由于励磁调节的作用, E_q 反而会增大。用 E_q 做辅助判据可以区分失磁失步和有励磁失步。利用等有功过程获取电气量信息, 可以实现保护快速动作。

3 新型失磁加速判据

3.1 提出的加速判据

在失磁发生后的等有功阶段, 功角、同步电动势变化特征是:

- 1) 功角变化率大于 0;
- 2) E_q 减小。

加速判据综合利用这两个电气量的变化规律来构成, 如图 2 所示。若加速判据在到达机端静稳极限圆之前持续成立, 则输出 1; 而在到达静稳极限之后软件实现保持输出 1。

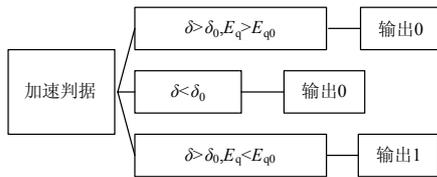


图 2 加速判据构成逻辑图

Fig.2 Accelerated criterion logic diagram

带有加速判据的保护配置逻辑框图如图 3 所示, 当加速判据和机端静稳极限阻抗圆同时满足, 各种闭锁判据不满足时, 将带延时地实现各类出口。带有加速判据的新型失磁保护配置可以减小常规配置里 t_0 、 t_1 、 t_2 的大小。常规失磁保护中, t_0 、 t_1 、 t_2 是为了躲励磁电压短时降低和区分有励磁振荡而采用的延时, 而新型失磁保护配置取消了励磁判据, 又可以实现区分有励磁振荡, 可以提前报警并进行

减出力控制, 避免了由于保护动作较慢使系统严重失稳而造成的切机。

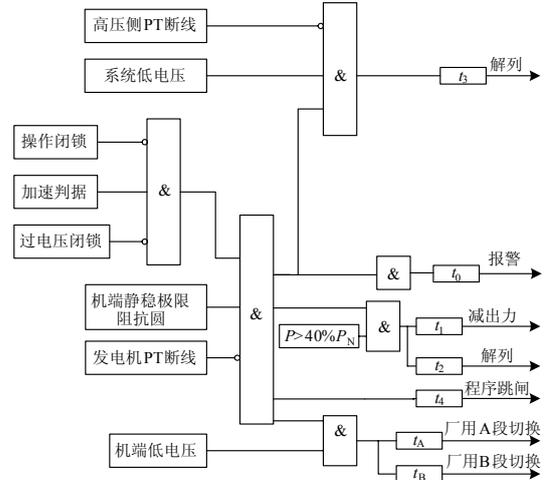


图 3 带有加速判据的失磁保护配置图

Fig.3 Loss-of field configuration with accelerated criterion

3.2 E_q 的获取方法

PMU 可以实现功角的实时测量, 因此, 通过实测发电机功率和功角可以计算出 E_q 。在等有功阶段, 由于转差所产生的附加量可以忽略不计, 有:

$$P = \frac{U_x E_q}{x_{d\Sigma}} \sin\delta + \frac{U_x^2}{2} \times \frac{x_d - x_q}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \sin 2\delta \quad (7)$$

$$E_q = (P - \frac{U_x^2}{2} \times \frac{x_d - x_q}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \sin 2\delta) x_{d\Sigma} / (U_x \sin\delta)$$

3.3 提出判据的有效性分析

下面分析几种情况下带有加速判据的新型保护配置方案能否正确判断。图 4~7 是 PSCAD/EMTDC 仿真 0.5 s 时发生励磁回路短路、切掉一回线导致失步、短路、电压短时降低四种情况下 E_q 的变化情况。

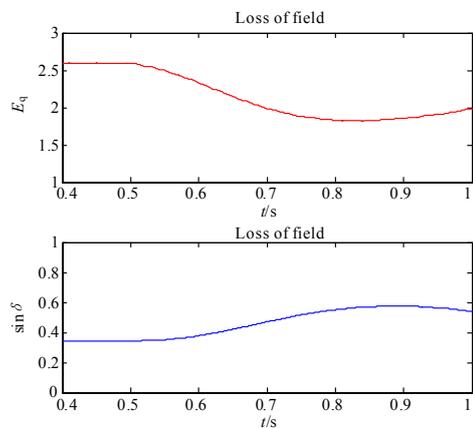


图 4 失磁前后的 E_q 及功角变化曲线

Fig.4 E_q and $\sin\delta$ when loss-of field

1) 失磁。如图 4 所示, E_q 减小, δ 增加, 加速判据满足, 机端阻抗轨迹又进入到静稳极限圆, 立即报警, 经过很小的延时减出力或解列, 保护可靠动作。

2) 有励磁失步。如图 5 所示, E_q 增大, δ 减小, 虽静稳极限圆满足, 但加速判据不满足, 保护可靠不动作。

3) 短路。如图 6 所示, 系统发生短路时, E_q 变大, 加速判据不满足, 保护可靠不动作。

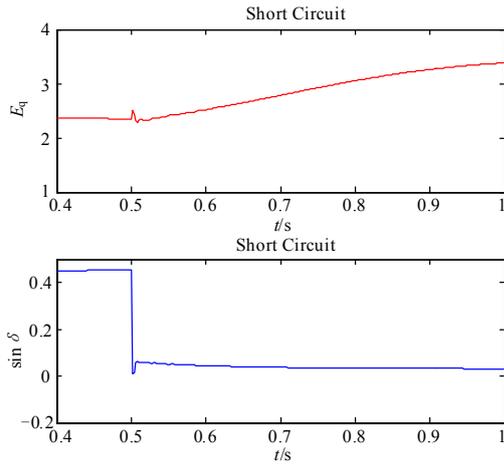


图 5 失步前后计算的 E_q 及功角变化曲线
Fig.5 E_q and $\sin\delta$ when out of step

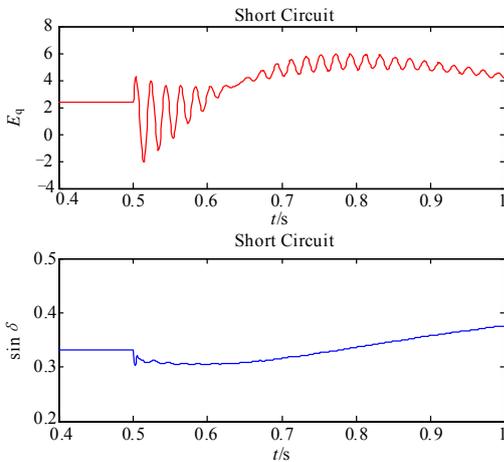


图 6 发生短路故障前后的 E_q 及功角变化曲线
Fig.6 E_q and $\sin\delta$ when short circuit

4) 进入静稳极限圆。由于突然甩负荷或操作不当引起的短时进入静稳极限圆或系统静稳破坏时, 若功率增大, 必将引起功角减小, 加速判据不动作; 若功率减小, 功角增加, 那一定是电压减小引起的, 如图 7 所示, 这时 E_q 会增大。加速判据不满足, 保护可靠不动作。

在正常情况或发生小扰动时, 无论各个电气量

如何变化, 只要没发生静态失稳, 机端阻抗静稳极限圆都不会动作, 保护可以正确不动作。

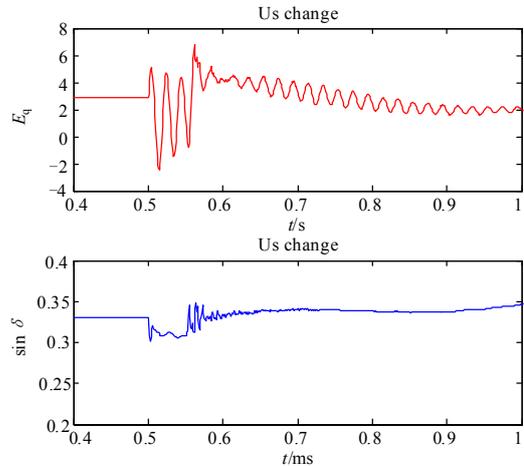


图 7 发生电压短时降低前后的 E_q 及功角变化曲线
Fig.7 E_q and $\sin\delta$ when U_s change

4 算例分析

利用 PSCAD/EMTDC 仿真分析失磁情况下带有加速判据的保护动作特性, 仿真模型如图 8 所示。0 s 时刻发生故障。表 1 是 600 MW 机组参数, 表 2 是不带加速判据而采用励磁电压辅助判据的失磁保护和带有加速判据的失磁保护性能对比。

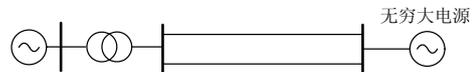


图 8 EMTDC 仿真模型
Fig.8 EMTDC simulation model

表 1 600 MW 机组参数

Tab.1 600 MW unit parameter

x_d	2.269 6	U	20 kV
x_q	2.209 3	I	19 245 A
x_t	0.1	T_J	5.578 s
x_d'	0.267 1	E_0	1.907
T_d'	1.027 s	T_{d0}'	8.724 s

表 2 传统判据和加速判据的动作时间对比

Tab.2 Comparison of action time between traditional criterion and accelerated criterion

	进入静稳极限 圆时间/s	报警 时间/s	减出力 时间/s	解列 时间/s
传统判据	2	2.3	3.5	4.5
带有加速判据	2	2.1	2.1	3.1

1) 从进入静稳极限圆到报警的 0.3 s 时间内是为了躲励磁电压短时降低采用的延时, 带有加速判

据的保护没有励磁电压的限制,取 0.1 s 的装置延时即可。

2) 从进入静稳极限到减出力的 1.5 s 延时主要为了区分失磁与有励磁振荡的情况,带有加速的保护已实现了区分,采用 0.1 s 的装置延时即可。

3) 从减出力到解列给定 1 s, 所以解列时间依次减小。

由此可知,带有加速判据的失磁保护可以提前进行报警、减出力或解列,为下一步对机组进行的控制措施提供了更多的时间,有利于电力系统的稳定运行和发电机本身的安全。

5 结语

本文提出的基于同步电动势的失磁保护加速判据无需获取励磁侧电气量,有利于继电保护装置的正常运行,不但可以快速检测失磁故障,还可以有效区分短路、有励磁振荡等不正常运行方式,解决了失磁保护长期以来不能同时满足速动性和选择性的困扰。仿真结果表明,该加速判据优点突出,性能可靠,值得应用和推广。

参考文献

- [1] 王维俭, 侯炳蕴. 大型机组继电保护理论基础[M]. 二版. 北京: 水利电力出版社, 1989.
WANG Wei-jian, HOU Bing-yun. Large unit protective relaying[M]. Second edition. Beijing: Water Conservancy and Hydropower Press, 1989.
- [2] 张旭东. 不同原理发电机失磁保护误动分析与改进[J]. 电力系统自动化, 2003, 32(6): 63-65.
ZHANG Xu-dong. Analysis of misoperation of protection for loss of excitation and its improvement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 32(6): 63-65.
- [3] 殷建刚, 彭丰, 杨平, 等. 发电机失磁保护中系统低电压判据的探讨[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(12): 28-31.
YIN Jian-gang, PENG Feng, YANG Ping, et al. Discussion on low voltage criterion in field-loss protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(12): 28-31.
- [4] 孙显初. 对汽轮发电机失磁保护出口方式的探讨[J]. 继电器, 2006, 34(22): 78-80.
SUN Xian-chu. Discussion on trips way of the loss of field of steam turbine generator[J]. Relay, 2006, 34(22): 78-80.
- [5] 田丰, 李碧辉, 王伟. 含有U_L-P型转子低压失磁继电器失磁保护框图的优化[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 49-51.
TIAN Feng, LI Bi-hui, WANG Wei. Optimization of loss of field protection diagram based on U_L-P[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 49-51.
- [6] 林莉, 牟道槐, 孙才新, 等. 同步发电机失磁保护的改进方案[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(22): 88-92.
LIN Li, MOU Dao-huai, SUN Cai-xin, et al. Improvement on loss-of-excitation protection of synchronous generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(22): 88-92.
- [7] 季学军, 刘宏博, 姜玉磊, 等. 阻抗原理发电机失磁保护的改进[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(18): 74-76.
JI Xue-jun, LIU Hong-bo, JIANG Yu-lei, et al. Improvement on generator loss of excitation protection based on impedance principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(18): 74-76.
- [8] 李哲, 季学军, 王祖光. 基于发电机功率变化量的失磁保护辅助加速判据[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(15): 54-56.
LI Zhe, JI Xue-jun, WANG Zu-guang. An auxiliary accelerated judgment method for loss of excitation protection based on generator power variation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(15): 54-56.
- [9] 林韩, 邱国义. 微机保护实现自动判别失磁类型和预测失磁深度[J]. 中国电机工程学报, 1993, 13(5): 1-9.
LIN Han, QIU Guo-yi. Failure-mode-recognition and depth forecast in generator loss of field microcomputer protection[J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13(5): 1-9.
- [10] 林韩, 邱国义. 以新的虚拟物理量Et_q、E_fq_q为判据的新型计算机失磁保护[J]. 电力系统自动化, 1989, 13(4): 52-60.
LIN Han, QIU Guo-yi. New loss of field microcomputer protection based on Et_q, E_fq_q as criterion[J]. Automation of Electric Power Systems, 1989, 13(4): 52-60.
- [11] 郁涵. 发电机失磁保护中转子低电压二判据的比较[J]. 继电器, 2003, 31(9): 63-66.
YU Han. Comparison of the two criteria of rotor low voltage in the generator loss-of-field protection[J]. Relay, 2003, 31(9): 63-66.
- [12] 倪以信, 陈寿孙, 张宝磷. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin. Theory and analysis of dynamic power system[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

收稿日期: 2009-11-13

作者简介:

隋佳音(1984-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 333sjy@163.com

毕天姝(1973-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统保护与控制、WAMS 应用、人工智能在电力系统中的应用和故障诊断等。