

基于能量函数法的电网脆弱性评估

卢锦玲, 姬群星, 朱永利

(华北电力大学 电气与工程学院, 河北省 保定市 071003)

Power Grid Vulnerability Assessment Based on Energy Function

LU Jin-ling, JI Qun-xing, ZHU Yong-li

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

ABSTRACT: It is difficult for traditional certainty assessment method of power system security to consider the randomness of power system, so it is also difficult to offer real-time, quantitative and visual diagnosis information of security and health status of power system. Introducing the concept of power system vulnerability the authors extend traditional concept of power system security; considering the occurrence probability of contingency, by use of transient energy function the vulnerability of power system is quantitatively assessed in the viewpoint of transient security, and the index and threshold value of power system vulnerability are given. Results of calculation example analysis validate the rationality and effectiveness of the proposed method; meanwhile, these results also show that the proposed method can ensure the correctness security analysis while the computing time is saved.

KEY WORDS: transient energy function; power system vulnerability; vulnerability indicators; threshold value

摘要: 传统确定性电力系统安全评估方法难以考虑电力系统的随机性, 难以实时、定量和直观地提供电网安全健康状态的诊断信息。文章引入了电网脆弱性的概念, 拓展了传统的电力系统安全性概念, 并考虑预想事故发生的概率, 采用暂态能量函数法从暂态安全角度定量评估了电力系统的脆弱性, 给出了电力系统的脆弱性指标和阈值。算例分析结果表明该方法在保证安全分析结果正确性的同时节省了机时, 验证了该方法的合理性与有效性。

关键词: 暂态能量函数; 电网脆弱性; 脆弱性指标; 阈值

0 引言

自 2003 年“8.14”美加大停电以来, 电力系统安全防御成为一个研究热点^[1-4], 而传统的确定性电

力系统安全评估方法^[5]往往只就代表系统最严重情况的一个或几个预想事故进行暂态安全分析, 难以考虑电力系统的随机性, 难以实时、定量和直观地提供反映电网安全健康状态的诊断信息, 无法满足电力市场的要求, 易造成电力资源的浪费。因此必须将传统电力系统安全性的概念加以拓展, 并采用相应的新型评估方法对电力系统安全性进行评估。

最近, 相关研究人员提出了电力系统脆弱性^[6-10]的概念, 拓展了传统的电力系统安全性的概念。文献[11]提出了基于风险理论的复杂电力系统脆弱性评估方法。文献[12]提出了在强外力干扰下的电力系统脆弱性评估方法和脆弱性评价指标。文献[13]将人工神经网络法应用于电网的脆弱性评估。文献[14]提出了将广域测量技术用于事故后的多区域电网脆弱性评估, 并用广域严重性指数评价注入网络中的暂态能量。

对一个实际的电力系统, 事故的临界能量是衡量该事故对系统暂态稳定影响的一个重要指标。如果具有相同的事故能量, 则可通过直接比较同一类型预想事故间的临界能量大小得出同一类型预想事故间的严重程度。但对于不同类型的预想事故, 由于它们整定的事故清除时间不同, 事故清除时间的能量也可能不同, 因此它们之间的临界能量没有可比性, 再加上不同类型的预想事故发生的概率不同, 因此无法比较不同类型事故对电网脆弱性的影响。

此外, 无论是能量裕度还是时间裕度, 仅仅表达了某一具体事故发生和故障清除后的系统安全水平, 无法考虑事故发生的概率, 不能反映全系统运行状态的总体脆弱性水平。

本文将传统电力系统安全性的概念加以拓展, 引入电网脆弱性的概念, 考虑预想事故发生的概

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60574037)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC)(60574037)。

率,采用暂态能量函数法,从暂态安全角度快速定量地评估电力系统的脆弱性,给出电力系统的脆弱性指标和阈值,以了解电网的健康状况。

1 电力系统脆弱性的概念

近年来,脆弱性(vulnerability)一词经常出现在环境、生态、计算机网络及电力系统等领域中,用来描述相关系统及其组成要素易于受到影响和破坏,并缺乏抗拒干扰、恢复初始状态(自身结构和功能)的能力。

在电力系统中,脆弱性又被称为系统脆弱性,主要指系统承受干扰或故障的能力。电力系统脆弱性是一个新概念,是指电力系统因人为干预、信息、计算、通信、内部故障和保护控制系统等因素而潜伏着的大面积停电的灾难性事故的危险状态^[15],而这种危险状态是在系统发生故障时显露出来的,并表现为系统是否保持稳定和正常供电的能力。这一概念是针对系统防治灾变提出来的,与电力系统安全性、可靠性、稳定性密切相关。电力系统脆弱性分析是从整体和全局的角度系统地把握可能存在的脆弱环节。

2 电力系统脆弱性指标和阈值

由于电力系统脆弱性问题的复杂性,考虑电力系统脆弱性指标时,可以涵盖故障系统达到不稳定的时间裕度或能量裕度、系统切除负荷总量、发电机功角曲线的振荡幅度、电网解列程度、系统恢复时间等^[16]。文献[17]提出了2种脆弱性评估指标:一种是当前运行点与系统脆弱边界的最短距离,另一种是预期负荷的损失。文献[18]根据预想事故的时间裕度和事故发生的概率,定义了预想事故的风险指标。

由于上述文献评价指标存在没有考虑故障发生的概率或计算速度不尽如人意等问题,本文采用势能边界法快速求解出临界能量和故障切除时刻的能量,并考虑预想事故发生的概率,形成电力系统的脆弱性指标,设定一个可接受的基准值阈值。当系统的安全现状被评估后,系统的安全水平或脆弱性水平随之确定,系统是否脆弱主要取决于脆弱性指标大于还是小于设定的阈值。

(1) 绝对指标。根据预想事故临界能量,定义第 i 个预想事故的脆弱性指标为

$$P_i^J = P_i e^{-V_{\text{critical}}^i} \quad (1)$$

式中: P_i 为第 i 个预想事故发生的概率; V_{critical}^i 为第 i 个预想事故的临界能量。由于 $V_{\text{critical}}^i \geq 0$, 所以

P_i^J 的取值范围为 $(0, P_i]$ 。由式(1)知: V_{critical}^i 越小,事故脆弱性指标越大; $V_{\text{critical}}^i = 0$ 时对应的事故绝对性脆弱指标最大,其值为 P_i 。

(2) 相对指标。根据预想事故的临界能量和故障清除时间暂态能量的差值,定义第 i 个预想事故的相对脆弱性指标为

$$P_i^X = P_i e^{V_{\text{clear}}^i - V_{\text{critical}}^i} \quad (2)$$

式中 V_{clear}^i 为第 i 个预想事故清除时刻的临界能量。由于 $V_{\text{critical}}^i \geq 0$, 因此 P_i^X 的取值范围为 $(0, P_i e^{V_{\text{clear}}^i}]$ 。当 $V_{\text{clear}}^i \leq V_{\text{critical}}^i$ 时, $0 < P_i^X \leq P_i$; 当 $V_{\text{clear}}^i > V_{\text{critical}}^i$ 时, $P_i < P_i^X \leq P_i e^{V_{\text{clear}}^i}$; 当 $V_{\text{clear}}^i = V_{\text{critical}}^i$ 时,事故的脆弱性指标为 P_i 。

式(2)与实际电力系统的物理意义相符合,即事故的临界能量越接近事故清除时间的能量,电力系统的脆弱性越强。

(3) 综合指标。求上述绝对指标和相对指标的平均数,可以得到预想事故脆弱性综合指标,即

$$I_{Si} = \frac{P_i^J + P_i^X}{2} \quad (3)$$

可以得到

$$I_{Si} = \frac{P_i}{2} (e^{-V_{\text{critical}}^i} + e^{V_{\text{clear}}^i - V_{\text{critical}}^i}) \quad (4)$$

(4) 系统脆弱性指标。设向量 $I_S = [I_{S1}, I_{S2}, \dots, I_{Si}]^T$, 则系统的脆弱性指标定义为

$$P_S = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{N} \|I_S\|_1 + \|I_S\|_\infty \right) \quad (5)$$

式中: N 为进行脆弱性评估所考虑预想事故的数目; $\|I_S\|_1$ 和 $\|I_S\|_\infty$ 分别为向量 I_S 的“1”范数和“ ∞ ”范数,其表达式分别为

$$\|I_S\|_1 = \sum_{i=1}^N |I_{Si}| \quad (6)$$

$$\|I_S\|_\infty = \max_{1 \leq i \leq N} |I_{Si}| \quad (7)$$

式(6)反映的是系统所有预想事故的累加效应,而式(7)反映的是系统中具有最大脆弱性的预想事故的影响。将式(4)(6)(7)代入式(5)可得

$$P_S = \frac{1}{4N} \sum_{i=1}^N P_i (e^{-V_{\text{critical}}^i} + e^{V_{\text{clear}}^i - V_{\text{critical}}^i}) + \frac{1}{2} \max_{1 \leq i \leq N} |I_{Si}| \quad (8)$$

因为 $0 \leq P_i \leq 1$, $V_{\text{critical}}^i \geq 0$, 根据式(8)可以得到系统脆弱性指标的取值范围为 $\left[0, \frac{1}{4} + \frac{1}{4N} \sum_{i=1}^N e^{V_{\text{clear}}^i} + \frac{1}{2} e^{V_{\text{clear}}^k}\right]$, 其中 k 表示具有最大脆弱性指标的那个预想事故。当脆弱性指标大于或等于1时,电网脆弱

性很大。

(5) 阈值。依据能量裕度和事故发生概率定义的阈值为

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i e^{-\Delta V_{i\min}}$$

(9)

式中： α 为常数，假设为 0.1； $\Delta V_{i\min}$ 为事故 i 清除时的能量最小裕度，即

$$\Delta V_{i\min} = \alpha V_{\text{critical}}^i$$

(10)

当 $P_g \geq S$ 时，系统是脆弱的或不安全的；反之系统是坚强的，抗扰能力强。

3 电力系统脆弱性指标的计算和评估

根据上述电网脆弱性指标，本文提出了电网脆弱性评估方法，其具体实现步骤如下：

- (1) 进行故障前的潮流计算，求出稳定计算所需要的初值。
- (2) 采取泰勒级数法求解持续故障轨迹下的故障轨迹，泰勒级数取到 4 阶^[19]。
- (3) 计算每一时段的势能。注意计算轨迹时按故障网络计算势能。
- (4) 重复上述步骤直到势能达到最大值，此时的势能为临界能量。
- (5) 计算故障清除时刻的暂态能量^[20]。
- (6) 针对不同的预想事故类型，由式(4)计算预想事故的脆弱性指标，并将其按由大到小的顺序排列。
- (7) 由式(8)(9)计算全系统的脆弱性指标和阈值，评价电网脆弱程度。

电力系统脆弱性指标的计算流程见图 1。

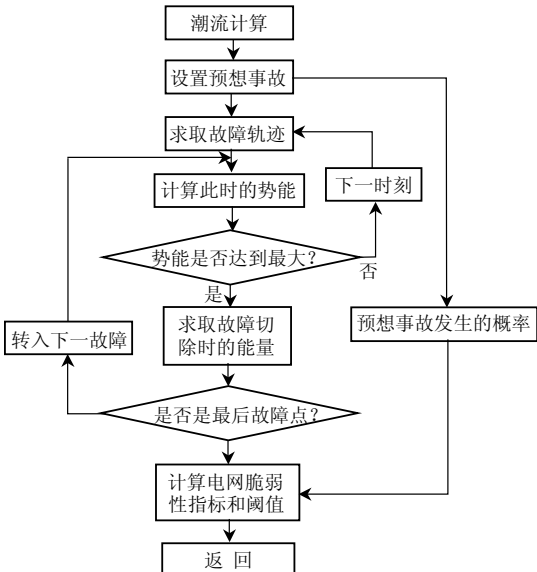


图 1 电力系统脆弱性指标的计算流程
Fig. 1 Calculation flow chart of power system vulnerability indicators

4 算例分析

采用本文的方法对图 2 所示的 IEEE 3 台发电机 9 节点典型电力系统进行分析。

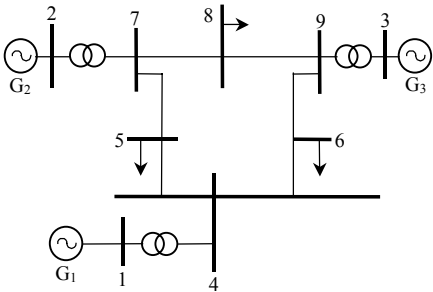


图 2 IEEE 3 机 9 节点系统

Fig. 2 IEEE 9 bus power system with 3 generators

不同类型事故清除时间不同，如 220kV 线路三相短路事故的清除时间为 0.15s 左右，而 500kV 线路的清除时间为 0.1s 左右。为便于计算，本文作出如下假设：仅考虑在线路出口处发生三相永久性事故，不考虑其它故障；线路靠近发电机的母线 4、7、9 侧发生的三相永久性事故的整定清除时间为 0.12s，而离发电机较远的母线 5、6、8 侧发生的三相永久性事故的整定清除时间为 0.16s；为说明上述指标的合理性、避免事故发生的概率掩盖了问题的其它方面，假定事故发生的概率相同。系统有 6 条线路，因此三相永久性事故有 12 种。预想事故信息如表 1 所示。表 2 列出了预想事故脆弱性的绝对指标、相对指标及综合指标。

根据表 2 的计算结果，将所有线路三相短路事故按各种指标排序，结果见表 3。从表 3 不但可以了解预想事故对电力系统脆弱性影响的排序情况，而且可以比较不同故障类型和不同类型事故对电网的影响。

当线路发生三相短路事故时，系统的脆弱性指标和阈值见表 4，其中 p 为每个预想事故的概率。

表 1 预想事故信息表

Tab. 1 Contingency information

事故编号	事故母线	断开支路	事故发生概率/%	整定清除时间/s
1	4	4—5	2	0.12
2	4	4—6	2	0.12
3	7	7—5	2	0.12
4	7	7—8	2	0.12
5	9	9—8	2	0.12
6	9	9—6	2	0.12
7	5	5—4	2	0.16
8	5	5—7	2	0.16
9	6	6—4	2	0.16
10	6	6—9	2	0.16
11	8	8—7	2	0.16
12	8	8—9	2	0.16

表 2 事故的脆弱性指标

Tab. 2 Contingency vulnerability indicators

事故编号	绝对指标	相对指标	综合指标
1	0.001 730 98	0.002 059 9	0.001 895 47
2	0.001 772 70	0.003 200 9	0.002 486 82
3	0.007 275 92	0.010 284 6	0.008 780 27
4	0.003 357 42	0.005 826 2	0.004 591 83
5	0.001 587 70	0.002 114 4	0.001 851 06
6	0.002 388 60	0.003 216 4	0.002 802 51
7	0.001 858 84	0.002 405 7	0.002 132 28
8	0.008 473 46	0.010 017 7	0.009 245 58
9	0.001 696 14	0.002 156 2	0.001 926 18
10	0.004 592 08	0.005 397 7	0.004 994 93
11	0.001 314 52	0.002 291 0	0.001 802 76
12	0.001 141 20	0.001 781 0	0.001 461 20

表 3 预想事故排序

Tab. 3 Contingency ranking

序号	按绝对性指标	按相对性指标	按综合性指标
1	8	11	9
2	7	6	6
3	2	1	2
4	4	3	4
5	10	10	10
6	5	5	5
7	6	7	7
8	1	2	1
9	9	9	8
10	3	4	3
11	11	8	11
12	12	12	12

表 4 系统脆弱性指标和阈值

Tab. 4 Vulnerability indicators and thresholds

事故类型	$p/\%$	系统的脆弱性指标	阈值
三相永久性短路	2	0.006 454 91	0.014 105 00

它用来表征全系统当前运行状态关于三相永久性短路的安全水平，它与阈值的比较结果反映了电网的脆弱水平，可为系统的运行和控制提供参考。

从表 4 可以看出，该系统的脆弱性指标为 0.006 454 9，其值小于阈值 0.014 105，其相对值为 0.457 633，所以该 IEEE 3 机 9 节点系统很坚强，具有足够的抗扰动承受能力。

以三相永久性事故为例，本文对中国电力科学院 CEPRI 36 节点典型电力系统进行了分析，再次验证了该方法的正确性和有效性。

5 结论

(1) 本文考虑了电力系统中的故障类型、故障发生的概率等不确定因素，提出了电力系统脆弱性的分析方法，定义了预想事故的脆弱性指标和门槛值，对电网健康状况做出了评价，使得综合各种类型预想事故的评价结果来评估全系统的脆弱性

成为可能。

(2) 该电力系统脆弱性分析方法根据能量裕度和预想事故发生的概率快速定量地表示电网的脆弱性，保证了电网脆弱性评估的正确性，避免解各个预想事故的临界切除时间，节省了机时。

(3) 该方法还有一些局限性，如自动重合闸、复故障、负荷故障、负荷模型、系统运行方式变化对脆弱性计算的影响及其在实际电网中的应用等还需进一步研究。

参考文献

[1] 赵希正. 强化电网安全保障可靠供电[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 1-7.
Zhao Xizheng. Strengthen power system security to ensure reliable delivery[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 1-7(in Chinese).

[2] 刘永奇, 谢开. 从调度角度分析“8.14”美加大停电[J]. 电网技术, 2004, 28(8): 10-15.
Liu Yongqi, Xie Kai. Analysis on blackout interconnected North America Power Grid occurred on Aug.14 2003 from the viewpoint of power system dispatching[J]. Power System Technology, 2004, 28(8): 10-15(in Chinese).

[3] 印永华, 郭剑波, 赵建军, 等. 美加“8.14”大停电初步分析以及应吸取的教训[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 10-15.
Yin Yonghua, Guo Jianbo, Zhao Jianjun, et al. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected North America Power Grid on Aug.14 2003[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 10-15(in Chinese).

[4] 蔡洋. 电网调度管理须与电网发展俱进——北美东北事故浅析[J]. 电网技术, 2004, 28(8): 6-9.
Cai Yang. Power system operation control should be in step with its expansion—A brief analysis of large scope blackout in interconnected North America Power Grid[J]. Power System Technology, 2004, 28(8): 6-9(in Chinese).

[5] 刘明志, 房大中, 宋文南, 等. 电力系统暂态稳定混合分析方法的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(2): 7-12.
Liu Mingzhi, Fang Dazhong, Song Wennan, et al. Improved hybrid method for transient stability assessment of power system [J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 1999, 11(2): 7-12(in Chinese).

[6] Mao Anji, Yu Jiaxi, Guo Zhizhong. Electric power grid structural vulnerability assessment[C]. Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Canada, 2006.

[7] Kang Lin, Keith E H. PRA for Vulnerability Assessment of Power System Infrastructure Security[C]. Proceedings of the 37th Annual North American, Illinois, USA, 2005.

[8] Pepyne D L, Panayiotou C G, Cassandras C G. Vulnerability assessment and allocation of protection resources in power systems [C]. Proceeding of American Control Conference, Arlington, Texas, USA, 2001.

[9] El-Sharkawi M A. Vulnerability assessment and control of power system[C]. IEEE/PES Asia Pacific Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2002.

(下转第 45 页 continued on page 45)

- [12] 孔雪娟, 王荆江, 彭力, 等. 基于内模原理的三相电压源逆变电源的波形控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 67-70. Kong Xuejuan, Wang Jingjiang, Peng Li, et al. The control scheme of three-phase voltage-source inverter output waveform based on internal model theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 67-70(in Chinese).
- [13] 黄科元, 贺益康, 卞松江. 矩阵式变换器交流励磁的变速恒频风力发电系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 100-105. Huang Keyuan, He Yikang, Bian Songjiang. Investigation of a matrix converter-excited variable-speed constant-frequency wind-power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 100-105(in Chinese).
- [14] Barbosa P G, Rolim L G B, Watanabe E H, et al. Control strategy for grid-connected DC-AC converters with load power factor correction[J]. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1998, 145(5): 487-491.
- [15] 孙驰, 毕增军, 魏光辉. 一种新颖的三相四桥臂逆变器解耦控制的建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 124-130. Sun Chi, Bi Zengjun, Wei Guanghui. Modeling and simulation of a three-phase four-leg inverter based on a novel decoupled control technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 124-130(in Chinese).
- 收稿日期: 2007-09-03.
作者简介:
郑连清(1964—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子与电力传动, E-mail: lqzheng64@tom.com;
王青峰(1983—), 男, 硕士, 研究方向为电力电子与电力传动, E-mail: wqf1983_2000@126.com.
- (责任编辑 沈杰)

(上接第 33 页 continued from page 33)

- [10] Jung Juhwan, Liu Chen-Ching. Multi-agent system technologies and all application for power system vulnerability[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2003.
- [11] 陈为化, 江全元, 曹一家, 等. 基于风险理论的复杂电力系统脆弱性评估[J]. 电网技术, 2005, 29(4): 12-19. Chen Weihua, Jiang Quanyuan, Cao Yijia, et al. Risk-based vulnerability assessment in complex power system[J]. Power System Technology, 2005, 2(4): 12-19(in Chinese).
- [12] 王鹏. 强外力骚扰电力系统及防护[J]. 电网技术, 2006, 30(3): 27-31. Wang Peng. Power system under external force harassment and its safeguard[J]. Power System Technology, 2006, 30(3): 27-31(in Chinese).
- [13] Qin Zhou, Davidson J. Application of artificial neural networks in power system security and vulnerability assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 9(1): 525-532.
- [14] Kamwa I, Béland J, Cnabb D. PMU-based vulnerability assessment using wide-area severity indices and tracking modal analysis [C]. Power Systems Conference and Exposition, Atlanta, USA, 2006.
- [15] Afouad A, Qin Zhou, Vittal V. System vulnerability as a concept to assess power system dynamic security[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 1009-1015.
- [16] 王鹏, 徐东杰, 王雪东, 等. 强外力骚扰下电力系统脆弱性评估与防护问题初探[J]. 华北电力大学学报, 2005, 32(1): 14-18. Wang Peng, Xu Dongjie, Wang Xuedong, et al. Preliminary research on vulnerability evaluation and safeguard of power system under external force harassment[J]. Journal of North China Electric Power University, 2005, 32(1): 14-18(in Chinese).
- [17] Mingoo Kim, El-Sharkawi, Robert J, et al. Vulnerability indices for power systems[C]. Proceedings of the 13th International Conference, South Korea, 2005.
- [18] 王守相, 张伯明, 郭琦. 基于时间裕度的全局电力系统暂态安全风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 51-55. Wang Shouxiang, Zhang Boming, Guo Qi. Transient security risk assessment of global power system based on time margin [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 51-55(in Chinese).
- [19] 刘笙, 汪静. 电力系统暂态稳定的能量函数分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1996.
- [20] 傅书遍, 倪以信, 薛禹胜. 直接法稳定分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- 收稿日期: 2007-10-25.
作者简介:
卢锦玲(1971—), 女, 副教授, 博士研究生, 研究方向为电力系统安全分析, E-mail: lujinling@126.com;
姬群星(1979—), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统分析、运行与控制, E-mail: jiqunxing2008@sina.com;
朱永利(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为人工智能和电网调度自动化, E-mail: yonglipw@heinfo.net.
- (编辑 杜宁)

秦山核电站扩建工程进入前期准备阶段

我国首座国产核电站——秦山核电站扩建 2 台百万 kW 机组核电项目核岛负挖工程已启动, 这标志着这座我国自主设计、建设和运营的核电站的扩建工程已进入前期准备阶段。据秦山核电公司有关负责人介绍, 方家山扩建项目的前期工作已获国家发改委正式批准, 其环境影响评价报告和厂址安全分析报告也已通过环境保护部评审。方家山扩建项目使用国际最成熟且应用最广泛的二代改进型压水堆核电技术, 计划工期 60 个月, 预计其 1、2 号机组将分别于 2013 年底和 2014 年 10 月正式投产。届时, 秦山核电公司的总装机容量将达到 2.3 GW, 每年向华东电网输送的电力超过 16 TWh。

在我国今年初的雨雪冰冻天气中, 核电对交通运输依赖小的优势明显体现。据核电专家介绍, 一座 1 GW 核电站每年只需 30 t 核燃料。此外, 核电站通常建于电力负荷的中心位置, 接入电网中心的输电线路较短, 因此受线路故障的影响也较小。