

通过选择 SVC 安装地点提高静态电压稳定性的新方法

张靖¹, 程时杰¹, 文劲宇¹, 彭志炜²

(1. 电力安全与高效湖北省重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074;

2. 贵州大学电气工程学院, 贵州省 贵阳市 550003)

A Novel Steady-state Voltage Stability Enhancement Method Based on SVC Allocation

ZHANG Jing¹, CHENG Shi-jie¹, WEN Jin-yu¹, PENG Zhi-wei²

(1. Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Lab (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, Hubei Province, China; 2. College of Electric Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, Guizhou Province, China)

ABSTRACT: Determination of location where static var compensator (SVC) and other types of shunt compensation devices should be installed is important for enhancement of power system voltage stability. With theory of normal forms of vector fields, a novel method to solve this problem is proposed. The proposed method makes use of nonlinear participation factors, in which effect of power system nonlinearity on voltage stability of the system can be considered. As a result, suitable location where SVC should be installed can be determined, even in condition that system is characterized with strong nonlinearity. In order to show effectiveness of proposed method, New England 39-bus power system with SVC is used as an example. Test results show very encouraging result. With SVC installation locations which proposed method determined, voltage stability is considerably increased.

KEY WORDS: power system; normal forms of vector fields; nonlinear system control; participation factor; static var compensator

摘要: 选择静止无功补偿器(static var compensator, SVC)或其它类型的并联型无功补偿装置的安装地点对提高电力系统电压稳定性是一个重要而实际的课题。该文提出一种采用向量场正规形理论,以非线性参与因子为依据,确定 SVC 安装位置的新方法。由于所提出的方法可计及电力系统非线性特性对电压稳定性的影响,因此与线性化分析方法相比,该文提出的方法在系统具有强非线性特性的条件下,仍能准

确选择 SVC 的有效安装地点。为验证所提出方法的有效性,将所提出的方法用于 New England 39 节点系统,确定在系统中使用 SVC 的最有效位置,通过对几种情况下系统电压稳定性指标的比较,验证所提出方法的有效性。

关键词: 电力系统; 向量场正规形; 非线性系统控制; 参与因子; 静止无功补偿器

0 引言

通过合适选择静止无功补偿器(static var compensator, SVC)等并联补偿装置的安装地点,可在很大程度上提高电力系统的电压稳定性^[1-3]。但在以往的研究中,确定 SVC 安装地点的方法大多采用对电力系统进行近似的线性化方法。在系统非线性特性并不严重的情况下,这种方法可给出很好的结果。文献[4]提出了模态分析法,并将之用于电压稳定研究。文献[5]采用模态分析对最危险模式进行研究,通过选择合适的 SVC 安装地点来提高电力系统静态电压稳定性。文献[6]以 $V-Q$ 灵敏度为指标,选择合适的并联补偿装置安装地点,从而提高电力系统的静态电压稳定性。文献[7]用右特征向量优化 SVC 的安装地点。

文献[8-9]采用有功参与因子分析发电机输出有功对传输容量的影响,扩展了传统的模态分析方法。但是在经济、环境和社会等因素的制约下,电力系统越来越接近其稳定运行极限点,在这种情况下系统将表现出强烈的非线性现象。由于系统的非线性对系统的性能有不可忽视的影响,因此采用以往的线性化方法,可能会导致不精确甚至是错误的结果。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2004CB217906); 国家自然科学基金项目(50595410)。

The National Basic Research Program (973 Program) (2004CB217906); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50595410).

向量场正规形是一种分析非线性系统动态行为的方法,近年来,它已被成功地引入电力系统分析^[10-17]。本文采用向量场正规形方法分析电力系统,并根据电力系统的2阶信息来选择SVC的安装地点,可显著提高电力系统静态电压稳定性。将该方法应用于New England 39节点系统,并采用电压稳定性指标对系统的稳定性进行检验。结果表明,和线性化方法相比,向量场正规形方法能更好地反映电力系统的非线性特性,可更有效地确定SVC的安装地点。

1 辅助动态系统及其正规形变换

电力系统的潮流方程可表示为

$$\begin{cases} P_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 & (i=1, 2, \dots, n-1) \\ Q_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 & (i=1, 2, \dots, m) \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_i 为节点*i*的电压; θ_{ij} 为节点*i*和*j*之间的相角差; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为连接节点*i*和*j*的传输线的电导和电纳; P_i 和 Q_i 分别为注入节点*i*的有功功率和无功功率; n 为系统的节点数; m 为系统的PQ节点数。

为计算电力系统的静态稳定裕度,文献[18]采用了一个与式(1)相关联的辅助动态系统,并在此基础上建立了系统的统一能量函数。辅助动态系统具有如下形式:

$$\begin{cases} \varepsilon \dot{\theta}_i = P_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ \varepsilon \dot{V}_i = Q_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\varepsilon > 0$ 是一个常数。

式(2)所示的动态系统可写为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{g}(\mathbf{x}) \quad (3)$$

式中 $\mathbf{x} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n-1}, U_1, U_2, \dots, U_m)^T$ 。

式(3)在平衡点处2阶Taylor展开为

$$\dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{J}_i \mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{H}^i \mathbf{x} / 2 \quad (4)$$

式中: \mathbf{J}_i 为潮流方程的雅可比矩阵 \mathbf{J} 的第*i*行; \mathbf{H}^i 为潮流方程的第*i*个海森子矩阵。

对式(4)进行线性变换,得 $\mathbf{x} = \mathbf{U} \mathbf{y}$, \mathbf{U} 为雅可比矩阵, \mathbf{J} 的右特征向量,则原系统的2阶Taylor展开在 \mathbf{y} 坐标下可表示为

$$\dot{y}_i = \lambda_i y_i + \mathbf{y}^T \mathbf{C}^i \mathbf{y} = \lambda_i y_i + \sum_{j=1}^{n+m-1} \sum_{k=1}^{n+m-1} C_{jk}^i y_j y_k \quad (5)$$

式中: λ_i 为雅可比矩阵 \mathbf{J} 的第*i*个特征值; $\mathbf{C}^i =$

$$\frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n+m-1} v_{ij} \mathbf{U}^T \mathbf{H}^i \mathbf{U} = [\mathbf{C}_{jk}^i], \quad v_{ij} \text{为矩阵 } \mathbf{V} = \mathbf{U}^{-1} \text{的元素。}$$

对于系统(3)来说,系统的2阶共振的条件为

$$\lambda_i = \lambda_j + \lambda_k \quad (6)$$

在不存在2阶共振的条件下,可通过式(7)所决定的正规形变换,消去式(5)的2阶项。

$$\mathbf{y} = \mathbf{z} + \mathbf{h}(\mathbf{z}) \quad (7)$$

$$\text{式中} \begin{cases} h^i(\mathbf{z}) = \sum_{k=1}^{n+m-1} \sum_{l=1}^{n+m-1} h_{kl}^i z_k z_l \\ h_{kl}^i = C_{kl}^i / (\lambda_k + \lambda_l - \lambda_i) \end{cases}$$

得到式(5)在 \mathbf{z} 坐标下的表达式:

$$\dot{z}_i = \lambda_i z_i \quad (8)$$

这样,可得到式(3)在 \mathbf{z} 坐标和 \mathbf{x} 坐标下的2阶解:

$$z_i(t) = z_{i0} e^{\lambda_i t} \quad (9)$$

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^{n+m-1} u_{ij} z_{j0} e^{\lambda_j t} + \sum_{j=1}^{n+m-1} \sum_{k=1}^{n+m-1} \sum_{l=1}^{n+m-1} h_{kl}^j z_{k0} z_{l0} e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \quad (10)$$

式中: u_{ij} 为矩阵 \mathbf{U} 的元素; z_{i0} 为在 \mathbf{z} 坐标下对应于 \mathbf{x}_0 的第*i*个初值。

从式(10)可看出:如果只计及系统的线性部分,则系统存在 $n+m-1$ 种模式,与系统的 $n+m-1$ 个特征值相对应,而且这些模式彼此是相互独立的。如果计及2阶项的影响,上述模式之间的相互作用就会体现出来,系统中的非线性现象是由于模式之间的相互作用产生的。

2 模式的参与因子

系统中每个节点对重要模式的参与程度决定了该节点对电压稳定性的重要程度。节点的参与程度可通过节点电压参与因子作为指标来衡量,电压参与因子越大,表明该节点对电压稳定性的影响越大,越适合安装SVC来提高电力系统的电压稳定性。

线性参与因子 p_{ki} 是模态分析中非常重要的概念,可通过下式计算:

$$p_{ki} = u_{ki} v_{ik} \quad (11)$$

式中 p_{ki} 为第*k*个状态变量对第*i*个模式作用的量度。

按文献[12]的方法,通过正规形分析,可得到包含2阶项影响的参与因子:

$$p_{2kj} = u_{kj} (v_{jk} + v_{jkk}) = u_{kj} (v_{jk} + v_{jkk}) \quad (12)$$

$$p_{2krs} = u_{krs} (v_{rk} + v_{rkk}) (v_{sk} + v_{skk}) \quad (13)$$

$$\text{式中: } v_{jkk} = - \sum_{p=1}^{n+m-1} \sum_{q=1}^{n+m-1} h_{pq}^j v_{pk} v_{qk}; \quad u_{krs} = \sum_{j=1}^{n+m-1} u_{kj} h_{rs}^j。$$

由式(12)可看出：线性参与因子 p_{kj} 是非线性参与因子 p_{2kj} 的一部分，而 $u_{kj}v_{jkk}$ 则是对线性参与因子 p_{kj} 的非线性修正项。 p_{2kj} 反映了第 k 个状态变量对第 i 个模式的量度。 p_{2krs} 为 2 阶参与因子，度量了状态对联合模式的作用。

采用重要模式的节点电压非线性参与因子 p_{2kj} 作为指标来衡量节点对电压稳定性的影响程度，节点电压非线性参与因子越大，表明该节点对电压稳定性的影响越大，越适合安装SVC来提高电力系统的电压稳定性。

3 SVC 安装地点的选择

以潮流方程作为基础进行分析，将最危险模式的非线性参与因子 p_{2kj} 作为识别SVC安装地点的依据。模式的节点电压非线性参与因子越大，表明该节点越适合选作安装SVC的位置。原因是：

(1) 在电力系统电压崩溃点附近，对雅可比矩阵进行模态分析，通过参与因子的大小可识别容易发生电压崩溃的节点，并且获得对系统电压稳定性影响最大的节点。但是传统的模态分析方法只能对静态非线性潮流方程进行线性化处理，系统的非线性特性在处理的过程中被忽略，结果可能会获得不准确甚至错误的信息。式(12)所示的非线性参与因子包含了对线性参与因子的 2 阶修正项，能反映系统的非线性特性。因此采用非线性参与因子作为选择 SVC 安装位置的依据，能得到更加准确可靠的信息。

(2) 文献[19]指出，在奇异点降阶雅可比矩阵和全阶雅可比矩阵的特征向量一致，但是在非奇异点，降阶雅可比矩阵和全阶雅可比矩阵的特征向量不一致，降阶雅可比矩阵不能正确反映系统的特征，而且随着运行点与奇异点之间距离的增加，误差也逐渐增加，因此在电压崩溃点之前，需要分析全阶雅可比矩阵来获取系统的正确信息。

4 算例分析

采用图 1 所示的 New England 39 节点系统作为算例，分别采用节点电压线性参与因子和非线性参与因子作为衡量指标，在负荷节点 1 到 29 中选择一个节点作为 SVC 的安装地点。

情形 1：轻负荷水平。该运行情况为 New England 39 节点系统的标准运行条件。选取最危险

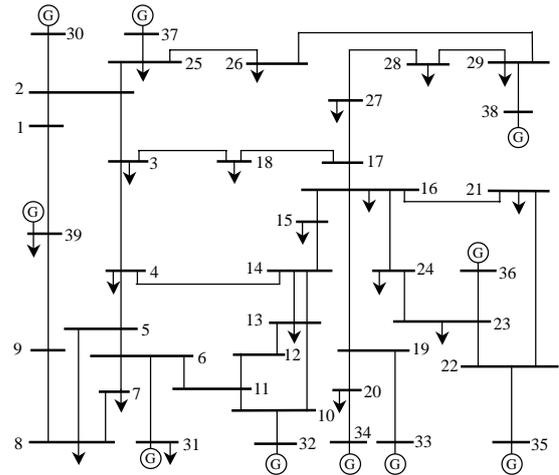


图 1 New England 39 节点系统
Fig. 1 New England 39-bus system

的模式作为重要模式，计算对应该模式的节点电压线性参与因子 p_{kj} 和非线性参与因子 p_{2kj} ，其结果比较见图 2，图中的数据均是以最大参与因子为标准，经过规格化处理得到的。从图 2 可看出，在轻负荷水平情况下，采用节点电压线性参与因子和非线性参与因子来识别SVC的安装地点，结果是一致的，节点 8 的电压线性参与因子和非线性参与因子均为最大。这种情况下，节点 8 最适合安装SVC，以提高系统的电压稳定性。

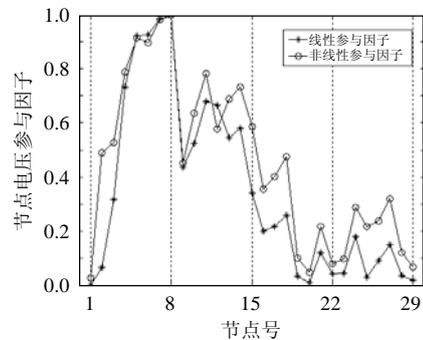


图 2 危险模式的节点电压参与因子(情形 1)
Fig. 2 Voltage participation factors for the critical mode in lightly loaded case

情形 2：重负荷水平。增加系统的带负荷水平，保持负荷功率因数不变，在情形 1 的负荷水平上，将节点 32 的发电机输出功率及节点 28 的负荷功率增加为原来的 2.65 倍，其余节点的负荷功率保持不变。选取最危险模式作为重要模式，计算节点电压线性参与因子 p_{kj} 和非线性参与因子 p_{2kj} ，结果如图 3 所示，图中的数据均是以最大参与因子为标准，经过规格化处理得到的。从图 3 可看出，在重负荷水平情况下，采用节点电压线性参与因子和非线性参与因子来识别SVC的最佳安装地点，结果是不

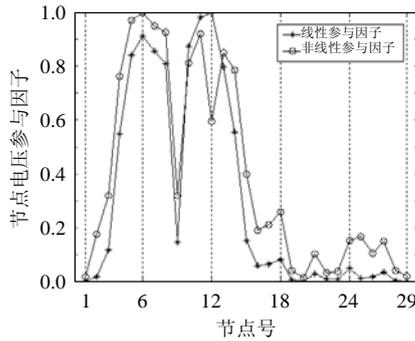


图3 危险模式的节点电压参与因子(情形2)

Fig. 3 Voltage participation factors for the critical mode in stressed case

一致的。节点 12 的电压线性参与因子最大，按照线性化分析结果，SVC 应该安装在该节点。而应用向量场正规形方法得到的节点 6 的电压非线性参与因子最大，根据正规形方法得到的结果，SVC 应该安装在 6 号节点。

潮流方程雅可比矩阵的特征值 λ 是用于度量电力系统接近电压崩溃的一种简单有效的指标^[20]。为验证SVC安装地点的合理性，采用最大特征值 λ_{\max} 作为电压稳定性指标。当系统为静态电压稳定时，其所有的特征值均为负数， λ_{\max} 越小，系统越稳定。

在情形 2 中，对不安装SVC及分别在节点 12 和节点 6 安装SVC的 3 种情况，计算该系统的电压稳定性指标 λ_{\max} ，结果如表 1 所示。对比表 1 中不同情况下 λ_{\max} 的大小可看出，在节点 12 和节点 6 安装SVC均能提高系统的静态电压稳定性，但是当SVC安装在节点 6 上时，系统的静态电压稳定性最高。这说明与在节点 12 安装SVC相比，在节点 6 安装SVC更有利于提高电力系统的静态电压稳定性。

表 1 不同情况下的系统最大特征值 λ_{\max}

Tab. 1 Maximum eigenvalues λ_{\max} for different situations

| 无 SVC | 节点 12 安装 SVC | 节点 6 安装 SVC |
|----------|--------------|-------------|
| -0.21358 | -0.3648 | -0.41465 |

5 结论

本文提出使用向量场正规形理论分析与电力系统潮流方程对应的辅助动态系统，并通过所得到的非线性参与因子选择 SVC 最有效安装地点。论文用最大特征值对采用向量场正规形方法和线性化方法分析电力系统电压稳定性的结果进行了比较，得出以下结论：

(1) 应用向量场正规形方法可得到系统的高阶解析解，由于它包含了电力系统更多的信息，因此更便于分析和理解复杂电力系统的非线性本质。

(2) 在轻负荷水平的电力系统中，由于模式之间的相互影响较小，系统的非线性较弱，因此采用线性化方法分析所得到的结果和采用向量场正规形方法分析所得到的结果一致。

(3) 在重负荷水平的电力系统中，由于模式之间的相互影响急剧增大，系统的非线性作用增强。由于向量场正规形分析方法可提供系统的非线性信息，因此采用非线性参与因子得到的结果将与采用线性分析方法所得到的结果不同。

(4) 由电压稳定性指标可见，使用 SVC 能显著提高电力系统的静态电压稳定性，而采用向量场正规形方法进行 SVC 的设备选址更加合理。

参考文献

- [1] Moghavvemi M, Faruque M O. Effects of FACTS devices on static voltage stability[C]. TENCON2000, Kuala Lumpur, Malaysia, 2000.
- [2] Boonpirom N, Paitoonwattanakij K. Static voltage stability enhancement using FACTS[C]. The 7th International Power Engineering Conference, Singapore, 2005.
- [3] 王杰, 阮映琴, 傅乐, 等. 计及动态负荷的电力系统静止无功补偿器(SVC)与发电机励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 24-29.
Wang Jie, Ruan Yingqin, Fu Le, et al. The nonlinear control of SVC and excitation of generators in power systems with dynamic loads [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 24-29(in Chinese).
- [4] Gao B, Morison G K, Kundur P. Voltage stability evaluation using modal analysis[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1992, 7(4): 1529-1542.
- [5] Mansour Y, Xu Wilsun, Alvarado F, et al. SVC placement using critical modes of voltage instability[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1994, 9(2): 757-763.
- [6] Song S H, Lim J U, Moon S II. Installation and operation of FACTS devices for enhancing steady-state security[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 70(1): 7-15.
- [7] Jurado F, Rodriguez J A. Optimal location of SVC based on system loadability and contingency analysis[C]. Proceedings ETFA'99, Barcelona, Spain, 1999.
- [8] Silva L C P, Wang Y, Costa V F, et al. Assessment of generator impact on system power transfer capability using modal participation factors [J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(5): 564-570.
- [9] Huang Z, Bao L, Xu W. Generator ranking using modal analysis [J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(6): 709-716.
- [10] Kshatriya N, Annakkage U D, Gole A M, et al. Improving the accuracy of normal form analysis[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2005, 20(1): 286-293.
- [11] Irma M, Messina A R, Barocio E. Perturbation analysis of power systems: effects of second- and third-order nonlinear terms on system dynamic behavior[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 71(2): 159-167.
- [12] Liu S, Messina A R, Vittal V. Assessing placement of controllers and nonlinear behavior using normal form analysis[J]. IEEE Trans. on

- Power Systems, 2005, 20(3): 1486-1495.
- [13] 邓集祥, 华瑶, 韩雪飞. 大干扰稳定中低频振荡模式的作用研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 60-64.
Deng Jixiang, Hua Yao, Han Xuefei. Study on effect of low frequency oscillation modes in large disturbance stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 60-64(in Chinese).
- [14] 张靖, 文劲宇, 程时杰. 基于向量场正规形的电力系统动态分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 1-5.
Zhang Jing, Wen Jinyu, Cheng Shijie. Power system dynamic characteristics analysis with the normal forms of vector fields[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(16): 1-5(in Chinese).
- [15] 徐东杰, 贺仁睦, 胡国强, 等. 正规形方法在互联电网低频振荡分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 18-23.
Xu Dongjie, He Renmu, Hu Guoqiang, et al. Analysis of low frequency oscillations using normal form method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 18-23(in Chinese).
- [16] 邓集祥, 赵丽丽. 励磁调节器对模式非线性相关作用的影响[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 69-74.
Deng Jixiang, Zhao Lili. Study on effect of excitation regulator on nonlinear modal interaction[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 69-74(in Chinese).
- [17] 李颖晖, 张保会, 李勤. 对电力系统暂态稳定边界的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 22(3): 72-77.
Li Yinghui, Zhang Baohui, Li Meng. Study on electrical power system stability boundary[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 22(3): 72-77(in Chinese).
- [18] Guedes R B L, Martins A C P, Alberto L F C, et al. An extended energy function for voltage collapse analysis considering voltage dependent load models[C]. Power Tech Conference Proceedings, Bologna, Italy, 2003.
- [19] Silva L C P, Costa D, Xu W. Preliminary results on improving the modal analysis technique for voltage stability assessment[C]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, USA. 2000.
- [20] Moon Y H, Ryu H S, Lee G J, et al. Uniqueness of static voltage stability analysis in power systems[C]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver, Canada, 2001.
- 收稿日期: 2007-01-15.
作者简介:
张 靖(1979—), 男, 博士研究生, 贵州大学讲师, 研究领域为电力系统稳定、运行与控制, zhangjing_s@163.com;
程时杰(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为电力系统运行与控制、人工智能在电力系统中的应用、低压电力线载波通信、超导电力等;
文劲宇(1970—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究领域为电力系统运行与控制、储能技术、电力电子等;
彭志炜(1958—), 男, 博士, 教授, 研究领域为电力系统稳定与控制。

(编辑 谷 子)

《中国电机工程学报》再次当选为“中国百种杰出学术期刊”

2007年11月15日, 2006中国科技论文统计结果发布会在北京国际会议中心召开。中国科技论文统计与分析项目是国家科技部委托项目, 由中国科学技术信息研究所承担, 至今已经连续进行了19年。

中国科学技术信息研究所每年出版的《中国科技期刊引证报告》定期公布中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)收录的中国科技核心期刊的19个科学计量指标, 主要包含总被引频次、影响因子、文献选出率、地区分布数、机构分布数、平均引文数、基金论文比、海外论文比等。以这些指标为基础, 由专家打分确定重要指标的权重, 并分学科对每种期刊进行综合评定, 从中评选出“中国百种杰出学术期刊”。

《中国电机工程学报》自2002年获得第一届“中国百种杰出学术期刊”的称号以来, 已经连续6年获得此项殊荣, 也是今年动力工程与电工技术学科内唯一获得此项称号的期刊。