

基于多属性群决策特征根法的智能电网黑启动决策

林振智¹, 文福拴¹, 薛禹胜², 周浩¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司, 江苏省南京市 210003)

摘要: 黑启动决策支持系统是智能电网的重要辅助决策工具。实际的黑启动决策一般是由多个决策者(如调度人员和/或其他电力专家)进行群体决策的。现有的黑启动方案评估方法绝大部分属于多属性个体决策方法,迄今未见黑启动群体决策方法方面的研究报道。在此背景下,提出了一种基于群决策特征根法的黑启动群决策优化方法,其根据 Perron-Frobenius 定理的推论,通过求解矩阵的最大正特征根对应的正特征向量,即可得到理想黑启动决策专家的综合评估值向量,之后利用数值代数中的幂法来求解该优化决策问题。最后,通过算例验证了该方法的合理性和有效性。算例分析表明该方法在一定程度上弥补了黑启动个体决策方法的不足,丰富了黑启动决策支持方法。

关键词: 智能电网; 黑启动; 决策支持系统; 多属性群决策; 群决策特征根法

0 引言

智能电网是电力工业发展的方向之一。发展智能电网对于保障能源安全、提高能源效率、改善能源结构、应对气候变化、提升服务水平具有非常重要的作用^[1]。近年来,智能电网在美、欧等国家和地区得到了推崇和研究。在美国,发展智能电网的重点在于配电侧和用电端,以推动可再生能源发展,提升商业模式的创新和对用户的服务质量。在欧洲,智能电网通常特指智能微型电网,着重于配电系统的智能化,即通过智能表计或相关设备,更好地指导用户用电^[2]。在中国,国家电网公司对智能电网的定义涵盖了发电、输电、变电、配电、用户和调度的各个环节,极大地扩展了欧美国家所提出的智能电网的内涵。

美国能源部倡议的现代智能电网具有 7 个重要特性:自愈、互动、抵御攻击能力、满足 21 世纪电能质量的需求、协调优化发电和储能、电力市场化、资产优化与高效运行。为此,需要研究如下技术:分布式发电、需求侧管理、综合通信系统以及决策支持系统^[3-5]。文献[6]提出一种智能电网垂直构架,其由智能装备层、智能生产调度层和决策管理层构成。由此可见,构建一个合理和完善的智能电网决策支持系统是建设智能电网的基础。智能电网决策支持系统应包括多个决策支持子模块(如黑启动决策支持系统等),分别实现不同的功能。虽然各个独立的

子模块实现的功能不同,但是各个子模块之间通过接口实现相互配合、共同辅助运行人员进行决策。

近年来世界范围内发生了多起大面积停电事故^[7-8]。虽然建设智能电网可以提高电力系统的自愈能力,但要完全避免大面积停电事故是不可能的。因此,在建设智能电网时,有必要深入而系统地研究电力系统完全或部分停电后的恢复问题,黑启动决策支持系统应该成为智能电网决策支持系统中的一个重要模块。其中,黑启动方案的优化决策是构造黑启动决策支持系统的核心内容,其对停电后的系统恢复速度具有重要影响^[7-10]。到目前为止,在黑启动决策方法方面国内外已经开展了不少研究工作,提出了不少方法,如专家系统^[11]、层次分析法^[12-13]、风险决策中的期望值法^[14]、分层案例推理法^[15]、数据包络分析技术^[16]以及层次化数据包络分析方法^[17-18]等。此外,文献[19]简要介绍了用于评价网架恢复的候选恢复目标的群体决策支持子系统的概念。综上所述,现有的黑启动决策研究主要集中于对单个黑启动决策者(即调度人员和/或其他电力专家)的黑启动方案的评估,尚未见到群决策方法在黑启动决策中应用的研究报道。

群决策是指以群体为决策主体所进行的决策活动,是主要的决策形式。由个体决策过渡到群体决策是人类社会决策活动取得长足进步的主要表现^[20-21]。实际的黑启动决策往往也不是只由一个调度人员或其他电力专家单独进行的,而是由多个系统调度人员和/或其他电力专家共同决策的。因此,有必要深入研究适合多个专家参与黑启动决策的方法,即黑启动群决策方法,以满足未来电力系统发展的需要。需要指出,虽然本文所研究的问题是黑启

收稿日期: 2009-10-07; 修回日期: 2009-11-30。

国家科技支撑计划资助项目(2008BAA13B10); 中国博士后科学基金资助项目(20090461352)。

动决策,但所采用的决策理论和方法具有比较普遍的意义,例如其也适用于智能电网决策支持系统中的其他决策子系统。

综上所述,一个完善的智能电网黑启动决策支持系统应该既包括黑启动个体决策方法,也包括群决策方法。本文对黑启动方案的群决策方法进行了研究,提出了一种基于群决策特征根法的黑启动群决策方法,并根据 Perron-Frobenius 定理的推论以及数值代数中的幂法来求解该优化决策问题。

1 基于多属性群决策理论黑启动决策方法

1.1 群决策简介

群决策作为一个确定意义的术语,从提出到现在的几十年中得到了快速发展,其理论和应用研究成为当前管理学界、数学界、经济学界、社会学界和政治学界的决策研究者所共同关心的话题和前沿研究领域。群决策主要着眼于复杂多目标的半结构化和非结构化决策问题,由群体中多个具有不同偏好的决策个体做出具有一定一致性的选择决策^[21]。典型的群决策方法有:名义群体法、德尔菲法、辩证询问法、魔鬼辩护法、多属性分析法等。决策方式由个体决策过渡到群决策是人类社会决策活动的一大进步。群体决策和个体决策各有优缺点,具体如表1所示。

表1 个体决策与群体决策的比较
Table 1 Comparison between individual and group decision-making

方法	人数	速度	准确性	风险性	效率
个体决策	1	较快	较差	视个人的知识、经验等而定	通常费时少,但代价高;效率由任务复杂程度决定
群体决策	≥2	较慢	较好	视整个群体的知识、经验等而定	从长远看,费用多,但代价低;效率高于个人决策

对于黑启动决策问题,有必要深入研究群体决策方法,以实现从现有的个体决策到群体决策的过渡,满足未来智能电网发展的需要。

1.2 基于群决策特征根法的黑启动群决策方法

群决策特征根法(group eigenvalue method)^[20]是一种依靠专家群体的知识和经验的常用群决策方法。下面介绍应用该方法解决黑启动决策问题的原理和算法步骤。

对于给定的黑启动群决策问题,假定有 m 个评价指标, n 个待评价的黑启动方案, s 个参与黑启动决策的调度人员和/或其他电力专家。记 $M = \{1, 2, \dots, m\}$, $N = \{1, 2, \dots, n\}$, $S = \{1, 2, \dots, s\}$ 。设黑启动决策指标集为 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$, 黑启动方案

集为 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, 黑启动群决策的专家集合为 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_s\}$ 。每个参与黑启动群决策的专家根据自己的专业知识和实际经验等分别对黑启动决策指标集 C 中的所有指标赋予指标权重,然后选择适当的个体决策方法来综合评价各个黑启动方案。设 V_{jl} 表示经标准化后的黑启动方案 j 对指标 l 的属性值, $V_{jl} \geq 0, j \in N, l \in M$; 专家 e_i 确定的指标权重向量为 $\omega_i = [\omega_{i1}, \omega_{i2}, \dots, \omega_{im}]$, 其中 $\omega_{il} \in [0, 1]$, $i \in S, l \in M$, 且 $\sum_{l=1}^m \omega_{il} = 1$ 。这里假设所有专家都采用简单加权法^[22]作为个体决策方法来得到对黑启动方案集 A 中各个方案的综合评价价值。当然,在实际决策过程中,专家们可以根据自己的偏好,在保证综合评价具有可比性的前提下,选择不同的决策方法(如层次分析法、数据包络分析法等)作为其个体决策方法。黑启动决策专家 e_i 对各个方案的综合评价价值可表示为一个 n 维列向量 $\mathbf{X}_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]^T \in \mathbf{E}^n$, 这样所有黑启动决策专家对所有黑启动方案的评价价值就可表示为一个 $s \times n$ 阶矩阵:

$$\mathbf{X} = (x_{ij})_{s \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{s1} & x_{s2} & \cdots & x_{sn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为黑启动决策专家 e_i 对黑启动方案 a_j 的综合评价价值, 且 $x_{ij} > 0; i \in S; j \in N$ 。

黑启动决策专家的决策水平不仅取决于其专业水平、经验、知识面和综合能力,而且与决策时的精神状态、情绪和偏好密切相关。因此,在现实生活中,黑启动决策可靠性达到最大值1的黑启动决策专家一般是不存在的。可以假设存在一个评估最准、最公正,即决策水平最高的理想(最优)黑启动决策专家 e_* , 其对各个黑启动方案的综合评价价值向量为 $\mathbf{X}_* = [x_{*1}, x_{*2}, \dots, x_{*n}]^T \in \mathbf{E}^n$ 。定义理想黑启动决策专家为:对各个黑启动方案的认知与黑启动决策专家群体 E 有最高一致性的专家,即专家 e_* 的黑启动决策结论与黑启动决策专家群体 E 的决策结论是完全一致的,并与黑启动决策专家个体间的差异最小。

定义综合评价向量与群体中各黑启动决策专家评价向量夹角之和最小的黑启动决策专家为该群体的理想黑启动决策专家 e_* 。由此可知,使函数 f 取得最大值时的向量 \mathbf{B} 即为所求的理想黑启动决策专家对各个黑启动方案的综合评价向量 \mathbf{X}_* 。

$$f = \sum_{i=1}^s (\mathbf{B}^T \mathbf{X}_i)^2 \quad (2)$$

式中: $\mathbf{B} = [b_1, b_2, \dots, b_n]^T \in \mathbf{E}^n$ 。

不失一般性, 设 $\|B\|_2 = 1$, 即可得:

$$\max_{B \in E^n} \sum_{i=1}^s (B^T X_i)^2 = \sum_{i=1}^s (X_i^T X_i)^2 \quad (3)$$

Perron-Frobenius 定理是非负矩阵理论的基本定理。该定理最早是由 Perron 提出的, 其研究了正矩阵的特征根特性; 随后, Frobenius 将此推广到了非负不可约矩阵中。为了求解理想黑启动决策专家对各个黑启动方案的综合评价值向量 X_* 和黑启动决策专家群体 E 对黑启动方案的总的综合评估值, 有必要先介绍 Perron-Frobenius 定理的结论^[20]。

根据 Perron-Frobenius 定理可知: 如果矩阵 U 为 n 阶非负不可约矩阵, 则

1) 矩阵 U 具有最大的正特征根 λ_{\max} , 且为单特征根。

2) λ_{\max} 对应的特征向量全部为正向量。

3) 当矩阵 U 的任一元素增加时, λ_{\max} 也将增加。

由于黑启动决策专家 e_i 对黑启动方案 a_j 的综合评价值 $x_{ij} > 0$, 这样由所有黑启动决策专家对所有黑启动方案的综合评价值矩阵 X 构成的方阵 $F = X^T X$ 为非负不可约矩阵, 因此其符合 Perron-Frobenius 定理的条件。经推导可得到以下定理^[20] (定理的证明详见附录 A):

定理 $\forall B \in E^n$,

$$\max_{B \in E^n} \sum_{i=1}^s (B^T X_i)^2 = \sum_{i=1}^s (X_i^T X_i)^2 = \lambda_{\max} \quad (4)$$

式中: λ_{\max} 为矩阵 $F = X^T X$ 的最大正特征根; X_* 为 λ_{\max} 对应于 F 的正特征向量, 且 $\|X_*\|_2 = 1$ 。

对于黑启动群决策问题, λ_{\max} 对应的正特征向量 X_* 即为理想黑启动决策专家的综合评估值向量 X_* 。

该定理给出了黑启动决策专家群体 E 对各个黑启动方案进行评价决策的特征根法。该方法求出的理想黑启动决策专家的综合评估值向量对应于各个黑启动方案的排序。

1.3 黑启动群决策方法的算法步骤

对于基于群决策特征根法的决策问题, 可以采用数值代数中的幂法快速求出 X_* 。具体算法如下^[20]。

步骤 1: 给定反映精度要求的 ϵ 值。

步骤 2: 令 $k=0$, $y_0 = [1/n, 1/n, \dots, 1/n]^T \in E^n$,

则 $y_1 = F y_0$, $z_1 = y_1 / \|y_1\|_2$ 。

步骤 3: 令 $k = k + 1$, 则 $y_{k+1} = F z_k$, $z_{k+1} = y_{k+1} /$

$\|y_{k+1}\|_2$ 。

步骤 4: 令 ϵ_z 为 z_{k+1} 与 z_k 中对应分量之差的绝对值最大者, 即 $\epsilon_z = \max_{j \in N} |z_{k+1,j} - z_{k,j}|$ 。判断 ϵ_z 是

否小于 ϵ , 若是则 z_{k+1} 即为所求的理想黑启动决策专家的综合评价值向量 X_* , 求解算法结束; 否则转步骤 3 继续迭代。

综上所述, 整个黑启动群决策的基本步骤为:

1) 每个黑启动决策专家合理确定黑启动决策指标集 C 中的每一个指标的权重。

2) 对黑启动的指标值进行标准化 (具体标准化原理可参见文献[20-21])。

3) 根据简单加权法或者其他个体决策方法计算每个黑启动决策专家 e_i 对各个黑启动方案 a_j 的综合评价值 $X_{ij} = \sum_{l=1}^m \omega_{il} V_{jl}$, $i \in S, j \in N, l \in M$ 。

4) 计算矩阵 $F = X^T X$ 。

5) 按照上述幂法的算法进行迭代计算, 直到得到理想黑启动决策专家的综合评价值向量 X_* 为止。

6) 根据 X_* 内各元素的大小进行排序, 即可得到相应的黑启动方案的优劣排序。

2 算例分析

这里采用文献[12, 22]中的算例来说明所提出的群决策特征根法。有关原始数据及其标准化处理方法可参见文献[22], 因篇幅所限, 这里不再给出。这里只给出标准化后各黑启动方案的指标值, 如表 2 所示。在该例中, 共有 6 个待评估的黑启动方案, 分别为 $a_1 \sim a_6$; 选取 5 个评估指标, 即待启动机组的额定容量 c_1 、所处的状态 c_2 、升负荷特性 c_3 、启动所需的电能 c_4 以及需要操作的开关数 c_5 。假定在黑启动决策时, 共有 4 位调度人员和/或其他电力专家参与, 分别为 $e_1 \sim e_4$ 。这些专家根据其各自的专业知识、运行经验等因素分别给各指标赋予了指标权重, 其向量分别为 $\omega_1 = [0.10, 0.10, 0.20, 0.30, 0.30]$, $\omega_2 = [0.30, 0.30, 0.15, 0.15, 0.10]$, $\omega_3 = [0.10, 0.15, 0.35, 0.25, 0.15]$, $\omega_4 = [0.20, 0.20, 0.20, 0.20, 0.20]$ 。

表 2 评估黑启动方案的指标值 (已标准化)
Table 2 Index values used to evaluate the black-start strategies (after standardization)

方案	指标 c_1	指标 c_2	指标 c_3	指标 c_4	指标 c_5
a_1	1.000	0.333	0.960	0.200	0.200
a_2	0.667	0.778	0.533	0.300	0.250
a_3	0.417	0.556	1.000	0.500	0.333
a_4	0.417	0.333	0.500	0.500	0.333
a_5	0.167	0.778	0.267	1.000	1.000
a_6	0.667	1.000	0.912	0.300	0.250

根据简单加权法可以计算出各个专家对各黑启动方案的综合评价值, 具体结果如表 3 所示。

表 3 黑启动方案的综合评价价值及排序
Table 3 Comprehensive evaluation values and optimization order of the black-start strategies

决策专家	黑启动方案的综合评价价值(x_{ij})						黑启动方案的排序
	方案 a_1	方案 a_2	方案 a_3	方案 a_4	方案 a_5	方案 a_6	
e_1	0.445 3	0.416 0	0.547 2	0.425 0	0.747 9	0.514 1	$a_5 > a_3 > a_6 > a_1 > a_4 > a_2$
e_2	0.594 0	0.583 3	0.550 0	0.408 3	0.573 4	0.706 8	$a_6 > a_1 > a_2 > a_5 > a_3 > a_4$
e_3	0.566 0	0.482 3	0.650 0	0.441 7	0.626 9	0.648 4	$a_3 > a_6 > a_5 > a_1 > a_2 > a_4$
e_4	0.538 7	0.505 4	0.561 1	0.417 6	0.642 3	0.625 7	$a_5 > a_6 > a_3 > a_1 > a_2 > a_4$

从表 3 可以看出,由于各个专家在专业知识、实际经验以及综合能力等方面存在着一些差别,使得其对黑启动方案的评价结果有相当的差异。只有专家 e_1 与 e_4 一致认为黑启动方案 a_5 为最优方案,而专家 e_2 和 e_3 认为的最优方案则不相同,且也与专家 e_1 和 e_4 的不同。在这种情况下,由于各个专家对黑启动方案的排序存在较大差异,如果没有一种合理的群决策方法综合考虑各个专家的评估结果,就难以达成一致,从而影响黑启动决策的进程以及恢复的速度。采用多属性群决策理论可以在相当程度上避免这样的问题。下面就用所提出的群决策特征根法进行决策。

计算矩阵 $F = X^T X$ 可得:

$F =$

1.161 7	1.077 0	1.240 5	0.906 2	1.374 5	1.352 8
1.077 0	1.001 3	1.145 6	0.838 6	1.272 6	1.255 1
1.240 5	1.145 6	1.339 3	0.978 0	1.492 5	1.442 6
0.906 2	0.838 6	0.978 0	0.716 0	1.096 5	1.054 2
1.374 5	1.272 6	1.492 5	1.096 5	1.693 7	1.598 1
1.352 8	1.255 1	1.442 6	1.054 2	1.598 1	1.575 8

可见, F 为非负不可约矩阵,故满足 Perron-Frobenius 定理的条件。因此,可以根据前述算法进行迭代求解。取 $\epsilon = 0.000 1$,得到的各次迭代结果如表 4 所示。

表 4 群决策法的各次迭代结果
Table 4 Iterative results of the group decision-making method

迭代次数 k	y_k	z_k
0	$[1/6, 1/6, 1/6, 1/6, 1/6, 1/6]$	
1	$[1.185 5, 1.098 4, 1.273 1, 0.931 6, 1.421 3, 1.379 8]$	$[0.394 6, 0.365 6, 0.423 8, 0.310 1, 0.473 1, 0.459 3]$
2	$[2.930 6, 2.715 2, 3.148 0, 2.303 7, 3.515 6, 3.410 9]$	$[0.394 5, 0.365 5, 0.423 8, 0.310 2, 0.473 3, 0.459 2]$
3	$[2.930 6, 2.715 2, 3.148 0, 2.303 8, 3.515 6, 3.410 9]$	$[0.394 5, 0.365 5, 0.423 8, 0.310 2, 0.473 3, 0.459 2]$

由表 4 可知:经过 3 次迭代,就已满足 $\epsilon = 0.000 1$ 的精度要求,此时得到的理想专家的综合评价价值向量为 $X_* = [0.394 5, 0.365 5, 0.423 8, 0.310 2, 0.473 3, 0.459 2]^T$ 。根据该综合评价价值向量,即可得出黑启动方案的群决策结果为: $a_5 > a_6 > a_3 > a_1 > a_2 > a_4$,即 a_5 为最优的黑启动方案。由表 3 和表 4 可以看出:专家 e_4 个体决策得到的黑启动方案排序与群决策结果一致,且专家 e_1 和 e_4 个体决策的最优黑启动方案与群决策方案相一致。这在一定程度上说明了所提出的群决策方法的合理性。

为进一步考察所提出的方法的合理性和有效性,这里分析有 5 位调度人员和/或其他电力专家(即 $e_1 \sim e_5$)参与决策的情形。假定这 5 位专家分别给各指标赋予的权重向量为 $\omega_1 = [0.20, 0.20, 0.20, 0.20, 0.20]$, $\omega_2 = [0.19, 0.21, 0.20, 0.19, 0.21]$, $\omega_3 = [0.18, 0.22, 0.19, 0.10, 0.31]$, $\omega_4 = [0.11, 0.39, 0.20, 0.15, 0.15]$, $\omega_5 = [0.20, 0.20, 0.20, 0.15, 0.25]$ 。在给定精度要求 $\epsilon = 0.000 1$ 的情况下,求得理想专家的综合评价价值向量 $X_* =$

$[0.383 1, 0.378 1, 0.410 5, 0.298 1, 0.478 8, 0.473 0]^T$;各个黑启动专家的个体决策和群体决策结果如表 5 所示。

表 5 黑启动方案的个体决策和群体决策结果
Table 5 Individual expert and group decision-making results of the black-start strategies

决策专家	黑启动方案的排序
专家 e_1	$a_5 > a_6 > a_3 > a_1 > a_2 > a_4$
专家 e_2	$a_5 > a_6 > a_3 > a_1 > a_2 > a_4$
专家 e_3	$a_5 > a_6 > a_3 > a_1 > a_2 > a_4$
专家 e_4	$a_6 > a_5 > a_3 > a_2 > a_1 > a_4$
专家 e_5	$a_5 > a_6 > a_3 > a_1 > a_2 > a_4$
群体	$a_5 > a_6 > a_3 > a_1 > a_2 > a_4$

从表 5 可以看出:专家 e_1, e_2, e_3 与 e_5 所做的黑启动决策结果完全一致,这 4 位专家给出的最优黑启动方案排序为: $a_5 > a_6 > a_3 > a_1 > a_2 > a_4$;只有专家 e_4 所做的黑启动决策方案与其他 4 位专家不同。之后,采用群决策特征根法进行群体决策,得到的最优黑启动方案排序为: $a_5 > a_6 > a_3 > a_1 > a_2 > a_4$ 。可见,所提出的群决策方法可以整合各个专家的决策

方案,得到的群体决策结果与多数专家的个体决策结果一致。这也在一定程度上说明了所提出的群决策方法的有效性和合理性。

3 结语

本文首先简要介绍了智能电网建设及其对黑启动决策支持系统的要求,之后提出了一种新的基于群决策特征根法的黑启动群决策方法,进而利用 Perron-Frobenius 定理以及数值代数中的幂法求取其最优(理想)解。该方法在一定程度上克服了传统个体决策方法的缺点,丰富和完善了黑启动决策的理论体系,可以为黑启动决策提供更全面的决策支持。

在黑启动方案实施过程中,电力系统的实际运行情况可能与预期的不同,因此黑启动方案及其评估过程都需要根据系统的实际运行情况进行动态调整。换言之,整个黑启动决策过程是一个根据电力系统的实际运行情况不断修正的动态决策和评估过程。本文只是在黑启动群决策方法方面作了一些初步的探索,还有很多内容亟待研究。例如:如何评估群决策结果的可靠性?如何合理确定群决策中各个专家的权重?下一步将就这些问题展开深入研究。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] AMIN S M, WOLLENBERG B F. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. *IEEE Power & Energy Magazine*, 2005, 3(5): 34-41.
- [2] BROWN R E. Impact of smart grid on distribution system design// *Proceedings of 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, July 20-24, 2008, Pittsburgh, PA, USA.
- [3] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网. 电网与清洁能源, 2009, 25(1): 7-11.
YU Yixin, LUAN Wenpeng. Smart grid. *Power System and Clean Energy*, 2009, 25(1): 7-11.
- [4] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述. 电网技术, 2009, 33(8): 1-7.
CHEN Shuyong, SONG Shufang, LI Lanxin, et al. Survey on smart grid technology. *Power System Technology*, 2009, 33(8): 1-7.
- [5] CHUANG A, HUGHES J, MCGRANAGHAN M, et al. Integrating new and emerging technologies into the California smart grid infrastructure, CEC-500-2008-047. Palo Alto, CA and California Energy Commission, Sacramento, CA, USA; EPRI, 2008.
- [6] 肖杰世. 构建中国智能电网技术思考. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 1-4.
XIAO Shijie. Consideration of technology for constructing Chinese smart grid. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(9): 1-4.
- [7] 薛禹胜, 费圣英, 卜凡强. 极端外部灾害中的停电防御系统构思: (一)新的挑战与反思. 电力系统自动化, 2008, 32(9): 1-6.
XUE Yusheng, FEI Shengying, BU Fanqiang. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters: Part I new challenges and reflection. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(9): 1-6.
- [8] 薛禹胜, 费圣英, 卜凡强. 极端外部灾害中的停电防御系统构思: (二)任务与展望. 电力系统自动化, 2008, 32(10): 1-5.
XUE Yusheng, FEI Shengying, BU Fanqiang. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters: Part II tasks and prospects. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(10): 1-5.
- [9] 薛禹胜, 王昊昊, 董朝阳, 等. 电力市场环境下的互联电网恢复控制的评述. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 110-115.
XUE Yusheng, WANG Haohao, DONG Zhaoyang, et al. A review on restorative control in interconnected grids under electricity market environment. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(21): 110-115.
- [10] 高远望, 顾雪平, 刘艳, 等. 电力系统黑启动方案的自动生成与评估. 电力系统自动化, 2004, 28(13): 50-54, 84.
GAO Yuanwang, GU Xueping, LIU Yan, et al. Automatic derivation and assessment of power system black-start schemes. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(13): 50-54, 84.
- [11] ADIBI M M, KAFKA L R J, MILANICZ D P. Expert system requirements for power system restoration. *IEEE Trans on Power Systems*, 1994, 9(3): 1592-1600.
- [12] 董张卓, 焦建林, 孙启宏. 用层次分析法安排电力系统事故后火电机恢复的次序. 电网技术, 1997, 21(6): 48-51, 54.
DONG Zhangzhuo, JIAO Jianlin, SUN Qihong. Arrangement of priority sequence of thermal unit restoration on analytical hierarchy process model. *Power System Technology*, 1997, 21(6): 48-51, 54.
- [13] 苏德生, 顾雪平, 赵书强, 等. 河北南网黑启动决策支持系统的研究开发. 电力系统自动化, 2004, 28(12): 45-50.
SU Desheng, GU Xueping, ZHAO Shuqiang, et al. Development of a black start decision support system for the southern power network of Hebei Province. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(12): 45-50.
- [14] 周云海, 闵勇, 杨滨. 黑启动及其决策支持系统. 电力系统自动化, 2001, 25(15): 43-46, 62.
ZHOU Yunhai, MIN Yong, YANG Bin. Decision support system for black-start. *Automation of Electric Power Systems*, 2001, 25(15): 43-46, 62.
- [15] 王洪涛, 刘玉田, 邱夕照. 基于分层案例推理的黑启动决策支持系统. 电力系统自动化, 2004, 28(11): 49-52.
WANG Hongtao, LIU Yutian, QIU Xizhao. Hierarchical case-based reasoning decision-making system for power system black start. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(11): 49-52.
- [16] 刘艳, 顾雪平, 张丹. 基于数据包络分析模型的电力系统黑启动方案相对有效性评估. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 32-37, 94.

- LIU Yan, GU Xueping, ZHANG Dan. Data envelopment analysis based relative effectiveness assessment of power system black-start plans. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 32-37, 94.
- [17] 刘艳,顾雪平. 评估黑启动方案的层次化数据包络分析方法. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 33-38.
- LIU Yan, GU Xueping. Hierarchical data envelopment analysis for assessing black-start plans. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(21): 33-38.
- [18] 林济铿,蒋越梅,岳顺民,等. 基于 DEA/AHP 模型的电力系统黑启动有效方案评估. 电力系统自动化, 2007, 31(15): 65-69, 110.
- LIN Jikeng, JIANG Yuemei, YUE Shunmin, et al. Assessment of effective schemes for power system blackstart based on DEA/AHP. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(15): 65-69, 110.
- [19] 刘玉田,王春义. 基于数据仓库的网架恢复群体智能决策支持系统. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 45-50.
- LIU Yutian, WANG Chunyi. Group intelligent decision support system for power system skeleton restoration based on data warehouse. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(1): 45-50.
- [20] 邱苑华. 管理决策与应用数学. 北京:机械工业出版社, 2002.
- [21] 徐玖平,陈建中. 群决策理论与方法及实现. 北京:清华大学出版社, 2009.
- [22] 林振智,文福拴,薛禹胜. 黑启动决策中指标值和指标权重的灵敏度分析. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 20-25.
- LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, XUE Yusheng. Sensitivity analysis on the values and weights of indices in power system black-start decision-making. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 20-25.

林振智(1979—),男,博士,现在博士后流动站从事研究工作,主要研究方向:电力系统恢复及电力系统稳定控制。
E-mail: zhenzhi.lin@gmail.com

文福拴(1965—),男,通信作者,特聘教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统故障诊断、系统恢复和电力市场。
E-mail: fushuan.wen@gmail.com

薛禹胜(1941—),男,中国工程院院士,国网电力科学研究院名誉院长,博士生导师,主要研究方向:电力系统自动化。

Black-start Decision-making in Smart Grids Using Multi-attribute Group Eigenvalue Method

LIN Zhenzhi¹, WEN Fushuan¹, XUE Yusheng², ZHOU Hao¹

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: A black-start decision support system is an important component of a smart grid. Up to now, research work on the decision-making of black-start strategies is mainly focused on individual decision-making methods, and no research work is reported on group decision-making ones. In practice, black-start decision-making is usually made by several decision makers, such as power dispatchers/domain experts, rather than by an individual one. Hence, it appears necessary to investigate the application of the group decision-making method to the development of optimal black-start strategies. Given this background, a group eigenvalue method is presented for the black-start decision-making. The positive eigenvectors associated with the maximal positive eigenvalue can be obtained with the application of the Perron-Frobenius theorem, and then the integrated evaluating value of the ideal black-start decision-making expert can be attained. The power method in the numerical algebra is employed to deal with the optimization problem associated with the group black-start decision-making. Finally, a numerical example is served for demonstrating the reasonableness and effectiveness of the developed method. It is demonstrated by case studies that the inherent shortcoming of the individual decision-making methods in evaluating black-start strategies could be overcome at least to some extent.

This work is supported by the Key Project of the National Science & Technology Pillar Program (No. 2008BAA13B10) and Post-doctoral Science Foundation of China (No. 20090461352).

Key words: smart grid; black-start; decision support system; group decision-making; group eigenvalue method

附录 A

证明： 因为 $f = \sum_{i=1}^s (B^T X_i)^2 = \sum_{i=1}^s (B^T X_i B^T X_i) = B^T \left(\sum_{i=1}^s X_i X_i^T \right) B = B^T X^T X B$, 故可用 Lagrange 乘子法求 f 的最大值, 构造函数 $g(b_1, b_2, \dots, b_n, \lambda) = B^T X^T X B - \lambda(B^T B - 1)$ 。

$$\text{令} \begin{cases} \frac{\partial g(b_1, b_2, \dots, b_n, \lambda)}{\partial b_j} = 0 & j = 1, 2, \dots, n \\ \frac{\partial g(b_1, b_2, \dots, b_n, \lambda)}{\partial \lambda} = 0 \end{cases}$$

可得: $X^T X B - \lambda B = 0$, $B^T B = 1$, 即 $FB = \lambda B$, $\|B\|_2 = 1$ 。

因此, f 取极值时, λ 是 F 的特征根, B 是 F 的特征向量。根据 Perron-Frobenius 定理的结论, 必可找到最大正特征根 λ_{\max} 对应的特征向量 X^* 全部由正分量组成, 且 X^* 唯一 (因为 $\|X^*\|_2 = 1$)。

下面证明求出的 X^* 使 f 达到最大值。

设 $\lambda_0 \neq \lambda_{\max}$ 为 F 的任一特征根, 其对应于 F 的特征向量为 b_0 , 则必有:

$$\lambda_{\max} > \lambda_0 \tag{A1}$$

$$FX^* = \lambda_{\max} X^* \tag{A2}$$

$$Fb_0 = \lambda_0 b_0 \tag{A3}$$

$$X_*^T X_* = b_0^T b_0 = 1 \tag{A4}$$

对式 (A2) 和式 (A3) 的两边分别左乘 X_*^T 和 b_0^T , 并由式 (A4) 可得:

$$X_*^T FX_* = \lambda_{\max} X_*^T X_* = \lambda_{\max} \tag{A5}$$

$$b_0^T Fb_0 = \lambda_0 b_0^T b_0 = \lambda_0 \tag{A6}$$

因此, 可得: $X_*^T X^T X X_* = X_*^T F X_* > b_0^T F b_0 = b_0^T X^T X b_0$, 即 $\sum_{i=1}^s (X_*^T X_i)^2 > \sum_{i=1}^s (b_0^T X_i)^2$ 。

由 λ_0 的任意性可得: $\max_{\|B\|_2=1} \sum_{i=1}^s (B^T X_i)^2 = \sum_{i=1}^s (X_*^T X_i)^2 = \lambda_{\max}$ 。

定理证毕。