

水火电机组统一优化排序方法在黑启动中的应用研究

电网黑启动过程中,发电机组启动次序的安排直接关系到整个系统的恢复进程。目前已有的研究成果主要是针对不具有自启动能力的火电机组进行优化排序,忽略了部分电网中黑启动电源承担为水电机组提供启动功率的任务。为实现将火电机组和水电机组的不同启动特性纳入同一个结构模型中排序,提出基于层次分析法的水火电机组统一排序层次结构决策模型。采取新的合理措施对无法完全量化的指标进行处理,通过熵权模糊法实现机组优化排序,可作为调度员在黑启动中安排机组启动次序的决策参考。相关算例的比较验证了该方法的有效性。

张洁¹ 刘天琪¹ 崔长江² 魏 玥¹/1.四川大学电气信息学院 2.广西电力调度通信中心



张洁/硕士研究生

关键词/Keywords

水火电机组·
优化排序·
统一层次模型·
熵权模糊法·
黑启动·

黑启动方案是电网发生大面积停电事故后调度部门为快速恢复系统所采取的一种紧急预案。在电网黑启动过程中,调度部门需要为无自启动能力的发电机组提供启动电源,若其启动次序安排不合理,将影响整个系统的恢复进程^[1]。已有研究成果主要是针对火电机组进行优化排序,但在我国水资源丰富的西部地区,如云南、四川、西藏、贵州和广西等省、市和自治区,实际电网中水电站的数量比较多,分布广泛,而通常一个分区内设置有一个主力水电厂作为黑启动电源,其余水电厂仍需要黑启动电源为其提供送电路径。在此情况下,如何合理安排黑启动电源为水火电机组提供启动功率的先后顺序成为首要研究问题。

机组启动顺序的优化是一个多目

标、多属性的决策问题,由于水火电机组在启动特性上有所不同,难以找到影响其启动顺序的共同因素,并且这些因素既有定量指标也有定性指标,对于水火电机组的启动其侧重点也不同,决策者很难做出客观公正的评价。文献[2-6]采用数学规划手段建立相应的模型和目标函数,没有全面考虑影响安排启动次序的定性因素。文献[7]将层次分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)应用于电力系统事故后火电机组恢复的排序,其层次模型不能应用于水火电机组启动顺序的优化,且传统的1-9标度法过分强调调度员的主观评价,忽略了客观因素的存在。文献[8-10]运用模糊数学理论,将定性指标定量化处理,相对于文献[7]能够保证其排序结果的客观性,但不能充分利用客观数据所蕴含的信息。

为此,提出一种新的层次结构决策模型,调度员根据运行经验对指标的定性评价可转换成相应的梯形模糊数。通过模糊层次分析法(Fuzzy AHP, FAHP)^[10]得到各项指标的先验权重,再与熵权^[11]结合获得其综合权重值。采取合理的措施对无法完全量化的指标进行处理,从而实现火电机组和水电机组在同一个模型下优化启动次序。

构造水火电机组统一排序层次结构决策模型

1. 影响火电机组恢复的主要因素

电力系统中不同的发电机组具有

广西电网黑启动技术支持系统及方案研究(12H1377)项目资助。

不同的启动特性。通过对电厂机组的统计数据进行分析,在黑启动过程中,影响火电机组恢复次序的主要因素如下。

1) 额定容量(单位:MW)。在黑启动初期,大容量机组一旦得到外部电源并启动成功,就可以在相对短的时间内恢复更多的机组和负荷,对整个进程起着巨大的推动作用。

2) 启动时间(单位:h)。火电机组辅机设备多,运行工况十分复杂,启动时间除由机组本身特性决定外,启动时的状态(极热态、热态、温态和冷态)和方式(滑参数、额定参数)对其也有影响。在安排启动次序时,根据当前机组启动状态与方式以及各个电厂的统计数据可确定该项参数。

3) 机组爬坡率(单位:MW/min),也称升负荷速率。火电机组启动并网后为避免爬坡过程中由于汽轮机进汽流量增加过快造成汽缸、转子温差过大,需按照热应力来控制爬坡率的大小。故升负荷速率是限制系统恢复出力的重要因素。

4) 启动功率(单位:MW)。火电厂的辅机设备将消耗一定功率才能成功启动机组。原则上优先选择出力多、厂用电量少的机组。

5) 路径指数。机组得到厂用电的能力也是决定其启动顺序的重要因素之一。本文在路径指数中主要考虑3类指标的加权平均,分别是系统给机组提供能量的最短路径长度、电压转换次数以及所经过断路器操作的数目。

6) 重要负荷供电。在黑启动初始阶段,其主要任务是尽可能多地恢复系统总的出力,兼顾尽早恢复重要负荷的供电,将社会经济损失减至最低。所以该项指标是重点考虑因素。

2. 影响水电机组恢复的主要因素

相比火电机组的特性,水电机组具有运行工况简单、操作简便、启动迅速和厂用电率低等优点。在和火电机组一起安排启动次序时主要考虑如下因素。

1) 额定容量(单位:MW)。为保证恢复阶段系统的安全稳定,水电机组能够配合火电机组的运行进行起停操作,所以初期形成的稳定小系

统要有一定容量的水电机组。

2) 机组负荷调整速率(单位:MW/min)。调度要求水电出力能快速随负荷指令变化以达到电网频率稳定。由此决定了水轮机组具有较快的负荷调整速率,从而能够加快系统的恢复进程。

3) 路径指数。实际系统中未承担自启动任务的水电厂也要从外界获得厂用电恢复本厂机组。

4) 重要负荷供电。水电机组附近若有重要负荷,也应优先考虑恢复供电。

3. 构造水火电机组统一排序层次结构决策模型

大停电事故后,电网黑启动的主要目标是机组恢复发电时间最短、总发电量最大、恢复供电可靠性高和尽快恢复重要负荷等。利用层次分析法的思想,分析并归纳影响火电、水电机组启动因素的特点,提出基于AHP方法构造的水火电机组统一排序层次结构决策模型,如下图所示。

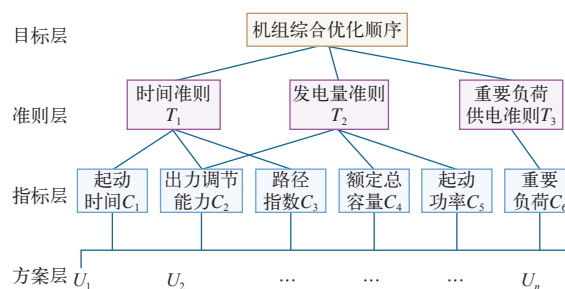


图 水火电机组统一排序层次结构决策模型

在该决策模型中,最终目标是得到一个满足多准则的综合优化顺序,而每个准则下又包含了多个指标。

时间准则包括机组的启动时间、出力调节能力和路径指数。在文献[7]的层次结构模型中,只考虑了火电机组的爬坡率指标,而加入水电机组参与排序以后,水轮机没有这一特性。火电机组并网后带负荷情况受爬坡率限制不能增长过快,水电机组则是以负荷调整速率控制其出力大小,这两个特性都体现了其出力调节的能力,为实现排序的一致性,提出一项新的指标,称为出力调节能力。在该指标下,火电机组沿用爬坡速率,水电机组沿用负荷调整速率。

发电量准则包括额定容量、出力调节能力和

起动功率。在实际电网黑启动过程中,一般是按电源点来考虑,即一台发电机成功起动后将迅速带厂用电起动其他发电机,所以该准则下第一项指标采用整个电厂的额定总容量。由于水电机组的起动时间短、起动功率小,在后续的指标参数处理中可忽略其参数值。

重要负荷供电准则主要考虑调度部门要求优先恢复有重要负荷的电源点。

基于熵权模糊法的统一优化排序

FAHP是在传统AHP方法的基础上引入专家模糊语言描述,通过模糊映射转换成定量模糊数,从而得到各层次权重的决策方法。该方法虽然引入了模糊数,但是其本质仍然是专家的主观赋权。为了体现客观数据所提供的有效信息,引入熵权的概念来刻画指标中方案间的差异度,以FAHP方法得到的向量作为先验权重,再与指标的熵权进行加权组合得到综合权重向量,采取合理量化的手段处理机组参数,最终实现统一优化排序。

1. 基于FAHP确定排序先验权重

(1) 构造判断矩阵

在图中的改进层次结构决策模型中, $\mathbf{R}=(r_{ij})_{q \times q}$ 为与目标层或准则层中某个准则有层次关系的 q 个因素所构成的模糊判断矩阵; $\mathbf{w}=[w_1, w_2, \dots, w_q]^T$ 为计算所得权重向量。

邀请 $L(L \geq 2)$ 位有丰富运行经验的调度员对判断矩阵中的因素进行两两比较,用定性语言描述它们之间的重要程度,利用文献[10]的模糊映射表将其转换成与之对应的梯形模糊数 r_{ij} 。

(2) 综合调度员的赋权信息

假设 $\mathbf{R}^{(k)}=(r_{ij}^{(k)})_{q \times q}$ 为第 $k(k \in L)$ 位调度员的梯形模糊数判断矩阵,其中 $r_{ij}^{(k)}=(a_{ij}^{(k)}, b_{ij}^{(k)}, c_{ij}^{(k)}, d_{ij}^{(k)})$ 。那么这 L 位调度员的综合赋权信息为

$$r_{ij}=(a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij})=\left(\frac{1}{L} \sum_{k=1}^L a_{ij}^{(k)}, \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L b_{ij}^{(k)}, \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L c_{ij}^{(k)}, \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L d_{ij}^{(k)}\right) \quad (1)$$

式中, $r_{ij}=(a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij})$ 为一个梯形模糊数。

(3) 检验一致性指标

定义 $\mathbf{R}=(r_{ij})_{q \times q}$ 的核矩阵^[12]为 $\mathbf{R}'=(r'_{ij})_{q \times q}$, 那么

$$r'_{ij}=K(r_{ij})=\begin{cases} a_{ij}, & a_{ij}=b_{ij}=c_{ij}=d_{ij} \\ \frac{c_{ij}^2+d_{ij}^2-a_{ij}^2-b_{ij}^2+d_{ij}c_{ij}-a_{ij}b_{ij}}{3(c_{ij}+d_{ij}-a_{ij}-b_{ij})}, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $r'_{ij}=K(r_{ij})$ 为一个梯形模糊数的核,是准确数,且 $0 < r'_{ij} < 1$ 。

核矩阵的一致性指标为

$$\rho=\frac{2}{q(q-1)(q-2)} \sum_{i=1}^{q-1} \sum_{j=i+1}^q \sum_{\substack{k=i+1 \\ k \neq i, j}}^q \left| r'_{ij}-\left(r'_{ik}+r'_{kj}-\frac{1}{2}\right) \right| \quad (3)$$

设定允许阈值 $\varepsilon=0.2$, 若 $\rho < \varepsilon$, 说明梯形模糊数判断矩阵 $\mathbf{R}$ 满足一致性要求; 反之, $\mathbf{R}$ 不一致, 则调度员应该重新进行赋权, 直到满足要求为止。

(4) 计算层次单排序权重向量

$$v_i(a_i, b_i, c_i, d_i)=\left(\frac{\sum_{j=1}^q a_{ij}}{\sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q d_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^q b_{ij}}{\sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q c_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^q c_{ij}}{\sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q b_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^q d_{ij}}{\sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q a_{ij}}\right) \quad (4)$$

式中, v_i 为梯形模糊数判断矩阵的评价值^[13], 其仍然是一个梯形模糊数。

假设决策者对风险持中立态度, 那么

$$I(v_i)=\frac{a_i+b_i+c_i+d_i}{4} \quad (5)$$

式中, $I(v_i)$ 为评价值 v_i 的期望^[14]。

将期望值归一化得到层次单排序的权重

$$w_i=\frac{I(v_i)}{\sum_{i=1}^q I(v_i)} \quad (6)$$

式中, w_i 为归一化后的排序权重值。

(5) 确定各指标的先验权重

由步骤 (1) ~ (4) 分别计算出准则层权重向量 $\mathbf{W}_A$, 指标层权重向量 $\mathbf{W}_{B1}$ 、 $\mathbf{W}_{B2}$ 和 $\mathbf{W}_{B3}$ 。排序指标的先验权重 $\mathbf{W}=[\mathbf{W}_{B1} \mathbf{W}_{B2} \mathbf{W}_{B3}]^T \mathbf{W}_A$ 。

2. 熵权的确定及其综合权重

假定 $U=\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 为待排序的机组集合, $C=\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ 为指标集合, $\mathbf{X}=(x_{ij})_{n \times m}$, 其中 x_{ij} 为第 i 台机组的第 j 个指标参数归一化后的值。各指标的熵^[15]定义为

$$E_j=-\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n x_{ij} \ln(x_{ij}) \quad j=1, 2, \dots, m \quad (7)$$

式中, $0 \leq E_j \leq 1$, 且规定当 $x_{ij} = 0$ 时, $x_{ij} \ln(x_{ij}) = 0$ 。与之对应的熵权定义为

$$\lambda_j = (1 - E_j) / \sum_{j=1}^m (1 - E_j) \quad (8)$$

式中, $0 \leq \lambda_j \leq 1$ 且 $\sum_{j=1}^m \lambda_j = 1$ 。

由熵权的定义可以看出, 如果不同机组在某一指标上的参数相当接近, 则熵权很小, 表明该指标的作用不突出。故待排序机组参数间的差异度越大, 则蕴含的客观信息越多, 其指标的熵权越大, 作用也就显得重要。

采用FAHP方法请专家赋权得到先验权重 $w = [w_1, w_2, \dots, w_m]^T$, 为达到既尊重实际调度经验的主观准则又能充分利用客观数据事实的目的, 结合熵权得到各指标的综合权重^[11]为

$$\mu_j = (w_j + \alpha \lambda_j) / \sum_{j=1}^m (w_j + \alpha \lambda_j) \quad (9)$$

式中, μ_j 为第 j 个排序指标的综合权重; α 为客观熵权对于主观权重的相对有效性系数, 设定 $0.3 \leq \alpha \leq 3$ 。最终得到的综合权重可以很好地反映各项指标在排序模型中的地位。

3. 机组的指标参数处理

为了便于分析, 第 i 台机组的第 j 个指标的实际参数用 z_{ij} 表示, 经过归一化处理得到规范化矩阵 $X = (x_{ij})_{n \times m}$ 。在本文的改进模型中, 对机组的实际参数处理如下。

启动时间 C_1 : 根据发电厂的统计数据可知, 一

般水轮机启动时间只需几分钟, 而汽轮机启动少则 30~60 min, 多则达数小时。忽略水电机组的启动时间 ($z_{i1} = 0$), 归一化机组实际参数

$$x_{i1} = z_{i1} / \sum_{i=1}^n z_{i1} \quad (10)$$

由于参数值与所占权值是互反的关系, 用 $1 - x_{i1}$ 代替 x_{i1} , 再经过归一化处理, 即

$$x_{i1} = (1 - z_{i1} / \sum_{i=1}^n z_{i1}) / \sum_{i=1}^n (1 - z_{i1} / \sum_{i=1}^n z_{i1}) \quad (11)$$

基于以上思想, 既保证了水电机组的优先级别, 又可以针对不同火电机组启动时间安排其所占比重, 为所有机组能在同一个模型下进行排序奠定了基础。同样的, 忽略水电机组的启动功率 ($z_{i5} = 0$), 该方法也应用于路径指数 C_3 和启动功率 C_5 两类互反型指标的处理。

出力限制速率 C_2 、额定总容量 C_4 和重要负荷 C_6 是正比例型指标, 按式 (10) 进行归一化。最后得到规范化矩阵 $X = (x_{ij})_{n \times m}$, 并由此得到机组启动的排序权重为

$$F = X[\mu_1 \mu_2 \dots \mu_m]^T \quad (12)$$

算例分析

实际的电力系统结构复杂多变, 机组参数随自身特性和网络拓扑的不同而有所区别, 采用某省级局部电网作为算例来验证所提方法的有效性。该局部电网待排序机组原始参数信息如表 1 所示。

表1 待排序机组参数信息

机组编号	电厂类型	额定容量/MW	额定总容量/MW	启动时间/h	出力调节能力/(MW/min)	路径指数	启动功率/MW	重要负荷
1	火	630	1 260	0.58	8	0.122	35.2	0
2	火	630	1 260	0.55	9	0.122	8.5	1
3	火	630	1 260	2.25	6	0.126	35.8	1
4	火	300	600	0.83	3	0.130	14	0
5	火	360	720	2	5	0.126	12.8	0
6	水	302.5	1 210	0	120	0.134	0	0
7	水	20	80	0	7	0.122	0	0
8	水	18	54	0	10	0.118	0	0

邀请3位在该电网中有丰富运行经验的调度员, 针对系统实际状况及需求为判断矩阵作出定

性描述, 其结果如表2所示。程序将依据表3中的映射关系将其转换成与之对应的梯形模糊数, 并

利用模糊层次分析法获得指标的先验权重： $w = [0.204\ 8\ 0.208\ 5\ 0.185\ 5\ 0.103\ 9\ 0.080\ 7\ 0.216\ 7]^T$ 。

按照式（10）、式（11）对表1中的参数进行归一化处理，得到规范化矩阵 X ，再根据式（7）、式（8）计算其排序指标的熵和熵权，从

而得到6个指标的熵权向量： $\lambda = [0.005\ 0.361\ 9\ 0.000\ 5\ 0.095\ 2\ 0.004\ 4\ 0.533]^T$ 。

设定相对有效性系数 $\alpha = 0.3$ ，根据式（9）可得出综合权重： $\mu = [0.158\ 7\ 0.243\ 9\ 0.142\ 8\ 0.101\ 9\ 0.063\ 1\ 0.289\ 7]^T$ 。

表2 调度员为判断矩阵作出的定性描述

矩阵	两两比较元素	前者相对于后者的重要程度评价		
		调度员A	调度员B	调度员C
判断矩阵1	时间准则与发电量准则相比	明显重要	明显重要	明显重要
	时间准则与重要负荷准则相比	强烈重要	强烈重要	明显重要
	发电量准则与重要负荷准则相比	明显重要	稍微重要	稍微不重要
判断矩阵2	起动时间与出力限制速率相比	稍微重要	强烈重要	明显重要
	起动时间与路径指标相比	同等重要	稍微重要	稍微不重要
	出力限制速率与路径指标相比	稍微不重要	稍微不重要	稍微不重要
判断矩阵3	出力限制速率与电厂总容量相比	同等重要	同等重要	同等重要
	出力限制速率与起动耗能相比	稍微重要	稍微不重要	稍微重要
	电厂总容量与起动耗能相比	明显重要	稍微重要	稍微不重要

表3 定性评价和梯形模糊数的对应表^[10]

定性评价	梯形模糊数标度
强烈不重要	(0, 0.05, 0.15, 0.2)
明显不重要	(0.1, 0.15, 0.25, 0.3)
稍微不重要	(0.2, 0.25, 0.35, 0.4)
同等重要	(0.3, 0.45, 0.55, 0.7)
稍微重要	(0.6, 0.7, 0.8, 0.9)
明显重要	(0.7, 0.8, 0.9, 1)
强烈重要	(0.8, 0.9, 1, 1)

按照式（12）计算机组起动的排序权重： $F = [0.075\ 5\ 0.224\ 2\ 0.211\ 9\ 0.059\ 9\ 0.059\ 9\ 0.244\ 2\ 0.060\ 5\ 0.063\ 8]^T$ 。其起动次序安排为：机组6→机组2→机组3→机组1→机组8→机组7→机组4→机组5。

为验证该算法的合理性与有效性，随机取一组起动顺序：机组1→机组2→机组6→机组3→机组4→机组5→机组7→机组8。计算两种起动次序在一定时段 t_{sum} 内恢复的最大有功功率 P ，结果如表4所示。

表4 算例有功功率对比表

时段 t_{sum}/h	最大有功功率 P/MW	
	优化顺序	随机顺序
2	2 235	1 190
6	3 184	4 193
10	5 620	5 585

可以看出，在黑启动初始阶段的2 h内，通过该算法得到的起动顺序能恢复更大的容量。该优化顺序保证了大容量水电机组6优先恢复以提高系统稳定性；机组2容量大，起动功率在火电机组中最小，同时它附近有重要负荷需要尽早恢复，排序权重较大；尽管机组3在起动时间和消耗功率两个指标上不占优势，但是因其附近有重要负荷的存在，且此时已有两个电源点恢复，即使成本较高也应该在接下来的时间里优先为其提供起动电源，所以在时段 $t_{\text{sum}} = 6\text{ h}$ 内优化顺序的最大有功功率低于随机顺序的最大有功功率。

结束语

提出一种基于AHP方法构造的新的层次结构决策模型，实现水电机组和火电机组在同一个模型中优化起动次序。通过熵权模糊法确定综合权重，充分考虑决策者判断的模糊性以及指标的客观性。合理制定机组指标参数的处理方式，克服了水、火电机组在某些参数上的差异性而导致无法定量处理的困难。调度员可根据电网实际状态更新机组参数或判断矩阵，其计算结果可为运行人员提供决策参考。

参考文献

- [1] 周敏, 刘艳. 计及火电机组启动过程的网架并行恢复策略 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (10): 30-34, 93.
- [2] Wei Sun, Chen-Ching Liu, Li Zhang. Optimal generator start-up strategy for bulk power system restoration [J]. IEEE Transactions on Power System, 2011, 26 (3): 1357-1366.
- [3] A.Ketabi, H.Asmar, A.M.Ranjbar, et al. An approach for optimal units start-up during bulk power system restoration [C]. Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, 2001: 190-194.
- [4] 陈海燕. 大停电后初期网架恢复序列的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- [5] 刘强, 石立宝, 周明, 等. 电力系统恢复中机组恢复的优化选择方法 [J]. 电工技术学报, 2009, 24 (3): 164-170.
- [6] 刘强, 石立宝, 周明, 等. 电力系统恢复控制的机组优化启动策略 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29 (4): 1-5.
- [7] 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组恢复的次序 [J]. 电网技术, 1997, 21 (6): 48-51, 54.
- [8] 贺星棋, 刘俊勇, 杨可, 等. 基于模糊矢量投影的机组优化恢复策略 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42 (4): 165-169.
- [9] 张志毅, 陈允平, 袁荣湘. 系统重构阶段机组最优恢复次序的模糊多属性决策法 [J]. 电工技术学报, 2007, 22 (11): 153-157.
- [10] Zhong Huirong, Gu Xueping. Determination of optimal unit start-up sequences based on fuzzy AHP in power system restoration [C]. Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011: 1541-1545.
- [11] 林济铿, 李童飞, 赵子明, 等. 基于熵权模糊综合评价模型的电力系统黑启动方案评估 [J]. 电网技术, 2012, 36 (2): 115-120.
- [12] 侯福均, 吴祈宗. 混合互补判断矩阵一致性研究 [J]. 数学的实践与认识, 2005, 35 (4): 46-55.
- [13] 刘雨华. 基于梯形模糊数的指标权重确定方法的应用研究 [J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2009, 1 (4): 369-372.
- [14] 牟琼, 杨春德. 一种基于梯形模糊数互补判断矩阵确定权重的方法 [J]. 重庆邮电学院学报: 自然科学版, 2006, 18 (6): 809-812.
- [15] 李荣钧. 模糊多准则决策理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.

(收稿日期: 2014-03-10) EA

(上接第41页)

弱阻尼的地区振荡模式。

3) 在所有机组投入PSS后, 小干扰稳定性满足标准要求, 说明机组投入PSS后有利于抑制振荡, 尤其对于特高压机组以及安徽省内的机组, 具有良好的振荡抑制。对于省内机组的地区振荡模式, 投入相关机组的PSS后均能有效地提高阻尼比。同时投入相应机组的PSS后, 安徽电网内也不存在弱阻尼的地区振荡模式。

4) 通过上述研究, 建议今后的工作中应通过试验以确定特高压送端机组及安徽电网新投运机组的PSS参数, 以便有效地提高特高压送端机组及

安徽电网内机组的抗干扰能力。

参考文献

- [1] 仲悟之, 宋新立, 汤涌, 等. 特高压交直流电网的小干扰稳定性分析 [J]. 电网技术, 2010, 34 (3): 1-4.
- [2] 顾丽鸿, 周孝信, 严剑峰, 等. 特高压联网区域实时小干扰稳定分析策略 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (13): 1-7.
- [3] 刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

(收稿日期: 2014-03-20) EA