

黑启动服务组合运行网络解析

徐建楠¹, 柳进²

(1. 江苏吴江供电公司, 江苏 吴江 215200; 2. 哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 在用户自备应急电源众多的地区, 用户应急柴油发电机是黑启动的重要后备资源, 可以按分布式发电的思路, 将它们组合起来为地方电网黑启动服务。对黑启动服务组合的运行网络进行了解析, 从该运行网络的有功、无功功率平衡解析式出发, 剖析了这种网络的运行特征。按发电机自励磁的引发条件, 提出了黑启动服务组合运行网络规避自励磁的电压/无功调控准则。

关键词: 分布式发电; 黑启动; 自励磁; 网络解析

Analysis of operating network for black start service combination

XU Jian-nan¹, LIU Jin²

(1. Wujiang Power Supply Company, Wujiang 215200, China;

2. Dept of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In the crowded region with user's emergent power supply for themselves, the user's emergent diesel generators are the important to preparative resource of black start. According to the viewpoint of distributed generation, it is feasible to combine the emergent diesel generators to serve the region power system of the black start. An analysis of operating network for black start service combination is made in this paper. From the analytical formulas of active and reactive power balances, the operating characters of such network are taken apart. In terms of the solicitation condition of generator self-excitation, the voltage/reactive power regulating guide lines of such network for avoiding self-excitation are proposed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50877104).

Key words: distributed generation; black start; self-excitation; network analysis

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)02-0055-05

0 引言

为了节能减排, 实施“火电机组上大压小”的方针, 原先被确定为黑启动电源的吴江汾湖电厂, 已于2008年10月关停。汾湖电厂燃油发电机组的关停, 对吴江电网与江苏主网解列极端状况下的黑启动, 产生了较大的困难和不确定性。吴江电网毗邻上海, 与长三角广大地区一样, 用户企业拥有自备应急柴油发电机者为数众多, 仅在吴江一地就不下两百多家, 这是吴江黑启动重要的后备资源。近年来在节能、可持续发展和电力市场环境的影响下, 分布式发电(DG(distributed generation))^[1-2]日益受到关注。吴江供电公司与哈工大有关研究组在联合调研的基础上, 从分布式发电的角度出发因地制宜,

充分考虑吴江上述黑启动后备资源丰富的优势, 提出了以“用户应急电源黑启动服务组合”为分布式电源, 在配电网的基础上重构“黑启动服务组合运行网络”, 向吴江热电联产燃煤发电机组提供启动功率的方案, 以填补汾湖电厂燃油发电机组关停给吴江电网黑启动带来的空白。

为什么“黑启动服务组合”不直接称为“黑启动机组组合”? 主要是由于“黑启动服务组合”中的用户应急发电机组并不归属电力部门, 其所有权属于用户企业。此处黑启动服务有两层意义, 一层意义是, 用户企业在特殊条件下以其应急发电机组的余富容量为社会的防灾减灾服务, 另一层意义是, 在拥有应急发电机组的用户企业为数众多的条件下, 有可能采取“电力市场黑启动辅助服务”的形式, 用市场化的手段来形成黑启动服务组合。

参与黑启动服务的用户形成应急发电机组组合

基金项目: 国家自然科学基金项目(50877104)

(以下简称黑启动服务组合)中,柴油发电机组的台数,首先视被启动的燃煤火电机组容量和柴油发电机组富余容量的具体情况而定。少则2~3台,多则4~5台或者更多。黑启动服务组合中,柴油发电机组一般在各自的用户变电所从400 V电压等级入网,其富余功率通过电网不同电压等级的线路(包括110 kV或更高电压等级的线路)送到起先被启动的燃煤火电机组那里去提供厂用电,以驱动其辅机。对于电网10 kV以上的线路而言,黑启动服务组合的富余功率和相应的传输潮流是十分微小的。这容易在黑启动服务组合运作网络中,出现线路电容性无功功率大于负荷感性无功功率的现象,很可能引发应急柴油发电机产生“自励磁”。在黑启动服务组合逐台并网和并网后的黑启动运作阶段,如何有效避免发电机发生自励磁^[3-4],是黑启动服务组合运行网络需要解决的关键技术问题之一。

本文对黑启动服务组合的运行网络进行了解析,从这种运行网络的有功、无功功率平衡解析式出发,剖析了这种网络的运行特征。按发电机产生自励磁的条件^[5],提出了黑启动服务组合运行网络规避自励磁的电压/无功调控准则。

1 黑启动服务组合运行网络

黑启动服务组合中用户应急柴油发电机,分布在不同地方。需要与配电网某些送变电元件联接起来,经过重构形成“黑启动服务组合运作网络”。用户应急柴油发电机通过这种运行电网不同电压等级的线路,首先向被启动、容量较小火电燃煤机组的辅机供电。如图1所示。

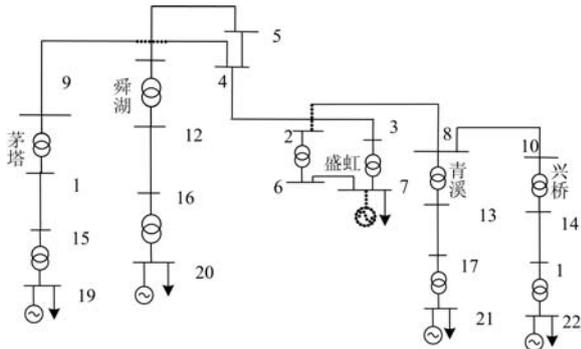


图1 黑启动服务组合的运行电网

Fig.1 Operating network for black start service combination

在图1中,节点7上虚线画的发电机组表示被启动的火电燃煤机组,节点7的负荷是被启动机组的辅机电用负荷。节点19、20、21、22的用户应急电源构成黑启动服务组合。该组合中各个用户的应急柴油发电机一方面给本用户提供应急用电,另一

方面都拿出部分功率通过不同电压等级的线路,向被启动小火电燃煤机组的辅机供电,当小火电燃煤机组启动成功以后,黑启动服务组合及其运行网络就完成了黑启动初始阶段的任务,电网黑启动进程就转入新阶段。在新阶段,首先被启动起来的小火电燃煤机组将向容量较大的火电燃煤机组的辅机供电,展开较大容量机组的启动进程。

1.1 黑启动服务组合运行网络的功率平衡

黑启动服务组合运作网络的有功功率平衡和无功功率平衡,可以分别由式(1)和式(2)表述。

$$\sum_{i=1}^{N_{BS}} P_{Gi} = \sum_{i=1}^{N_{BS}} P_{Li} + P_{LA} + \sum_{j=1}^{N_B} I_j^2 r_j \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{BS}} Q_{Gi} = \sum_{i=1}^{N_{BS}} Q_{Li} + Q_{LA} + \sum_{j=1}^{N_B} I_j^2 x_j - \sum_{k=1}^{N_N} V_k^2 \frac{1}{2} \sum_{jek} b_j \quad (2)$$

式中: N_{BS} 为参与黑启动服务的用户数; N_B 为黑启动服务运作电网的支路数; N_N 为黑启动服务运作网络的节点数; P_{Gi} 和 Q_{Gi} 分别为黑启动服务组合中,第 i 号用户应急柴油发电机的有功功率和无功功率; P_{Li} 和 Q_{Li} 分别为黑启动服务组合中,第 i 号用户应急用电负荷的有功功率和无功功率; P_{LA} 和 Q_{LA} 分别为首先被启动、容量较小火电燃煤机组辅机电用的有功功率和无功功率; r_j, x_j, b_j 分别为黑启动服务运作网络第 j 号支路的电阻、感抗和容纳;

jek 表示 j 支路与 k 节点相连接; $\frac{1}{2} \sum_{jek} b_j$ 表示对所有与 k 节点相连接支路的二分之一容纳之和。

1.2 黑启动服务组合运行网络的运行特征

黑启动服务组合运行网络有一个重要特点,就是用户的应急柴油发电机和变电所容量小,而10 kV以上的送变电元件(线路和变压器)容量大。这些送变电元件在电网正常运行时,能够满足负荷高峰期传送较强大电功率的需要;而在黑启动服务组合运作时,只传送应急柴油发电机组发出的数百千瓦电功率,对它们而言可以说负担特别轻微。换句话说,黑启动服务组合运作网络是在特轻负载条件下运行的。

这种运行网络在特轻负载条件下,运行特征是各支路电流非常小。

$$\forall j, I_j \ll 1 \quad j \in C_{branch} \quad (3)$$

其中: C_{branch} 为黑启动服务组合运行网络支路号集合。考虑到35 kV电压等级以下(含35 kV电压等级)线路的容纳可以忽略不计,对于式(2)右端的线路电容性无功功率总和,可以近似地写出

$$-\sum_{k=1}^{N_N} V_k^2 \sum_{j \in k} \frac{1}{2} b_j \approx -V_{AV}^2 \sum_{h \in C_{brch110}} b_h。$$

其中: $C_{brch110}$ 为 110 kV 电压等级以上 (含 110 kV 电压等级) 支路号的集合; V_{AV} 为 110 kV 电压等级以上节点电压 (标么值) 的平均值。由式 (3), 任一支路的电流 I_j 都非常小, 其标么值远小于 1, 那么任一支路的电流的平方 I_j^2 就会更小。除了黑启动服务组合应急电源入网的变压器支路电抗外, 一般支路的电抗 x_j 为数都不大, 因此一般支路的 $I_j^2 x_j$ 可以忽略不计, 式 (2) 右端的线路电感性无功功率总和近似地等于 $\sum_{j=1}^{N_b} I_j^2 x_j \approx \sum_{j \in C_{trans0.4}} I_j^2 x_j$ 。其中: $C_{trans0.4}$

为 0.4~10 kV 变压器 (黑启动服务组合应急电源入网变压器) 支路号的集合。

考虑到以上近似关系以后, 由式 (2) 表述的黑启动服务组合运行电网的无功功率平衡, 能够得到简化。

$$\sum_{i=1}^{N_{BS}} Q_{Gi} \approx \sum_{i=1}^{N_{BS}} Q_{Li} + Q_{LA} + \sum_{j \in C_{trans0.4}} I_j^2 x_j - V_{AV}^2 \sum_{h \in C_{brch110}} b_h \quad (4)$$

无功功率平衡式的简化, 有助于规避自励磁调控准则的简捷运用。

2 黑启动服务组合中发电机的自励磁

黑启动服务组合中用户应急柴油发电机容量小, 而其运行网络的送变电元件传输容量大。在这种条件下, 这种运行网络线路部分的无功功率之和一般呈电容性; 运行网络负荷 (包括被启动发电机组的辅机负荷和用户自身的应急负荷) 部分的无功功率之和, 一般呈电感性。

如果线路部分的电容性无功功率之和, 在数值上大于负荷部分的电感性无功功率之和, 一般情况下发电机的外部等值负荷将呈现电容性, 此时发电机电流将越前于电压, 其无功功率呈电容性。这是发电机产生自励磁的条件^[5]。

发电机自励磁的机理, 可以从周期性变化自感和互感三相电路参数谐振的角度去解释, 也可以从三相超前电流电枢反应旋转磁场的增磁作用的角度去解释。以下从后一角度, 概述发电机的外部等值负荷呈现电容性时, 会出现自励磁现象的机理。

发电机外部等值负荷呈现电容性时, 无功功率呈电容性, 电流越前于电压, 定子三相电流产生的电枢反应旋转磁场, 对于转子磁极的磁场具有增磁作用, 将增大发电机的电动势和电压; 电压增大后, 定子三相电流及其对转子磁极磁场的增磁作用, 将

进一步增大, 这又会进一步增大发电机的电动势和电压……这样下去, 就会出现磁场不断增强, 电压不断增大的“自励磁”现象。

旋转磁场不断增强、发电机电压不断增大的自励磁不会无止境增长, 因为有一些因素 (如电机磁路的饱和与励磁调节器等) 制约自励磁。电机磁路饱和后磁感应强度不再随磁势线性增长, 而励磁调节器则具有力图维持机端电压恒定的机制。虽然自励磁不会导致发电机电压无止境增长, 但却有可能使电压增长到危险的程度。

3 规避自励磁的运行网络调控准则

3.1 电网无功功率电感性成分占优准则

发电机的外部等值负荷呈现电容性时会出现自励磁, 此时发电机无功功率呈电容性。要想规避自励磁, 必须避免发电机无功功率呈电容性。有效的办法是设法使电网无功功率电感性成分占优, 也就是设法保证电网电感性无功功率成分大于电容性无功功率成分。

由式 (4), 黑启动服务组合中发电机发出的无功功率总和等于电网所有负荷的无功功率总和加上送变电元件 (线路和变压器) 的无功功率总和。发电机无功功率总和与电感性成分占优时, 式 (4) 左端 $\sum_{i=1}^{N_{BS}} Q_{Gi}$ 具有正值 (电感性无功功率为正, 电容性无功功率为负), 式 (4) 右端存在式 (5) 所示关系:

$$\sum_{i=1}^{N_{BS}} Q_{Li} + Q_{LA} + \sum_{j \in C_{trans0.4}} I_j^2 x_j > V_{AV}^2 \sum_{h \in C_{brch110}} b_h \quad (5)$$

式 (5) 能够帮助人们定量地掌握无功功率电感性成分占优准则。

要想发电机发出的无功功率总和 $\sum_{i=1}^{N_{BS}} Q_{Gi}$ 具有正值, 需要黑启动服务组合运行网络所有负荷的无功功率总和 $\sum_{i=1}^{N_{BS}} Q_{Li} + Q_{LA}$ 足够大。所谓“足够大”, 如何定量掌握, 就是要求 $\sum_{i=1}^{N_{BS}} Q_{Li} + Q_{LA} + \sum_{j \in C_{trans0.4}} I_j^2 x_j$ 大于 110 kV 电压等级以上线路的 $V_{AV}^2 \sum_{h \in C_{brch110}} b_h$, 而

$\sum_{j \in C_{trans0.4}} I_j^2 x_j$ 和 $V_{AV}^2 \sum_{h \in C_{brch110}} b_h$ 的具体数值, 不难从潮流计

算的输入输出数据得到。

如果运行网络所有负荷的无功功率总和

$$\sum_{i=1}^{N_{BS}} Q_{Li} + Q_{LA} + \sum_{j \in C_{transf0.4}} I_j^2 x_j$$

不够大，可以鼓励参加黑启动服务组合的用户，增大其自身应急用电负荷，

$$\text{以使 } \sum_{i=1}^{N_{BS}} Q_{Li} + Q_{LA} \text{ 增大，如果仍然不够大，可以考}$$

虑扩大黑启动服务组合及相应的运行网络，在新加入的 110 kV 电压等级以上线路的容纳相对较小的前提下，接纳新的用户应急发电机及其用电负荷；或者在运行网络范围内装用并联电抗器等。

3.2 发电节点电压均衡准则

在黑启动服务组合运行电网形成过程的各个阶段，从组合中用户应急柴油发电机的逐一并网，直到黑启动服务组合运行电网最终形成，都要注意保持诸发电机间电压的均衡，力求降低发电节点间电压的差异。这就是发电节点电压均衡准则。

当无功功率电感性成分占优准则得到满足时，

$$\sum_{i=1}^{N_{BS}} Q_{Gi} \text{ 具有正值。若此时发电机电压均衡准则也得}$$

到满足，则组合中任何一个用户应急柴油发电机的无功功率将具有正值，即

$$\forall Gi, Q_{Gi} > 0, Gi \in C_{Gnode} \quad (6)$$

其中：C_{Gnode} 为运作网络中柴油发电机节点号集合。

然而，若此时发电节点电压均衡准则得不到满足，则式(6)难以得到满足，可能出现有的用户应急柴油发电机的无功功率具有负值，甚至可能出现多数用户应急柴油发电机的无功功率具有负值的情况，下一节的数值简例将具体展示这一问题。

4 数值简例

文献[5]第 6 章的小结中写道，“起励后的自励磁，是一种稳定的运行状态”。意思是说，虽然自励磁的起励是一个发电机电压危险上升的暂态过程，但由于实际存在磁路饱和等因素，发电机电压不会无限上升，而最终要稳定在某一固定值（尽管有时此值非常大），所以说，自励磁在起励结束之后将进入一种稳态运行状态。据此，可以运用潮流解算的方法，从源流路径分析的角度，来体会黑启动服务组合运行网络规避自励磁的调控准则。

设图 1 黑启动服务组合运行网络各支路参数如表 1。

表 1 运行网络各支路参数

Tab.1 Branch parameters in operating network

序号	首节点	末节点	电阻	电抗	容纳/2 或变比
1	1	5	0.000 7	0.002 4	0.000 001 5
2	1	-12	0.0	3.19	1.0
3	2	-6	0.0	6.38	1.0
4	2	8	0.007 1	0.022 1	0.000 013 5
5	3	4	0.027 2	0.090 5	0.000 059 7
6	3	-7	0.0	6.38	1.0
7	4	5	0.002 1	0.006 9	0.000 004 4
8	4	9	0.018 1	0.093 5	0.000 061 7
9	6	7	0.0	0.000 01	0.0
10	8	10	0.068 9	0.229 1	0.000 151 1
11	8	-13	0.0	3.19	1.0
12	9	-11	0.0	3.137	1.0
13	10	-14	0.0	3.19	1.0
14	11	15	3.003	3.438	0.0
15	12	16	4.204	4.813	0.0
16	13	17	6.006	6.876	0.0
17	14	18	4.204	4.813	0.0
18	15	-19	0.0	70.0	1.0
19	16	-20	0.0	70.0	1.0
20	17	-21	0.0	70.0	1.0
21	18	-22	0.0	70.0	1.0

注：末节点号为负时，对应变压器支路。

潮流解算中，发电节点 21 是平衡节点，发电节点 19、20、22 是 PT 节点。

表 2、3、4 三种情形中，无功功率电感性成分占优准则均得到满足，三种情形的无功发电功率总和 $\sum Q_{Gi}$ 均具有正值。表 2 情形中，发电机电压均衡准则得到满足，组合中各个用户应急柴油发电机的无功功率均具有正值，并且在数值上彼此相差不大。

表 2 发电节点电压均衡准则得到满足的情形

Tab.2 Voltage equilibrium rule for generating node is satisfied

节点	V	angle	P _L	Q _L	P _G	Q _G
7	1.003 8	-0.836 7	0.000 600	0.000 300	0.0	0.0
19	1.000	-0.044 3	0.000 127	0.000 084	0.000 280	0.000 017 7
20	1.000	-0.027 8	0.000 127	0.000 084	0.000 280	0.000 016 7
21	1.000	0.0	0.000 127	0.000 092	0.000 268	0.000 018 8
22	1.000	-0.026 3	0.000 127	0.000 092	0.000 280	0.000 019 3
Σ			0.001 108	0.000 652	0.001 108	0.000 072 5

注：功率的基值为 1 000 MW。

表 3 发电节点电压均衡准则未很好地满足的情形

Tab.3 Voltage equilibrium rule for generating node isn't well satisfied

节点	V	angle	P_L	Q_L	P_G	Q_G
7	1.005	-0.758	0.000 600	0.000 300	0.0	0.0
19	1.000	0.036 1	0.000 127	0.000 084	0.000 280	0.000 003 8
20	1.000	0.053 5	0.000 127	0.000 084	0.000 280	0.000 002 9
21	1.005	0.0	0.000 127	0.000 092	0.000 268 5	0.000 063 4
22	1.000	0.051 5	0.000 127	0.000 092	0.000 280	0.000 001 1
Σ			0.001 108	0.000 652	0.001 108 5	0.000 071 2

注: 功率的基值为 1 000 MW。

表 4 发电节点电压均衡准则未得到满足的情形

Tab.4 Voltage equilibrium rule for generating node isn't satisfied

节点	V	angle	P_L	Q_L	P_G	Q_G
7	1.006	-0.738 4	0.000 600	0.000 300	0.0	0.0
19	1.000	0.057 1	0.000 127	0.000 084	0.000 280	-0.000 010 2
20	1.000	0.075 4	0.000 127	0.000 084	0.000 280	-0.000 010 8
21	1.01	0.0	0.000 127	0.000 092	0.000 268 5	0.000 108 4
22	1.000	0.0742	0.000 127	0.000 092	0.000 280	-0.000 017 1
Σ			0.001 108	0.000 652	0.001 108 5	0.000 070 3

注: 功率的基值为 1 000 MW。

表 3 情形中, 发电机电压均衡准则未很好满足, 组合中各个用户应急柴油发电机的无功功率虽然均具有正值, 但是在数值上却存在很大差距。节点 21 的电压 $V_{21}=1.005$, 仅比 $V_{19}=V_{20}=V_{22}=1.000$ 略大, 0.5%, 但节点 21 的用户应急柴油发电机的无功功率 $Q_{G21}=0.000 063 4$ 要比 Q_{G19} 、 Q_{G20} 、 Q_{G22} 大很多。

表 4 情形中, 发电机电压均衡准则未得到满足, 组合中各个用户应急柴油发电机的无功功率不再全为正值了。节点 21 的电压 $V_{21}=1.01$, 比 $V_{19}=V_{20}=V_{22}=1.000$ 大 1%, 结果只有节点 21 的用户应急柴油发电机的无功功率 Q_{G21} 具有正值, 而 Q_{G19} 、 Q_{G20} 、 Q_{G22} 三者都变为负数了, 虽然无功发电功率总和 $\sum Q_{Gi}=0.000 070 3$ 具有正值, 但由于 $Q_{G21}=0.000 108 4 \gg 0.000 070 3$, 需要 Q_{G19} 、 Q_{G20} 、 Q_{G22} 三者都变为负数去平衡它。导致节点 19、20、22 的发电机发出容性无功功率, 亦即它们的外部等值负荷呈现电容性, 进入自激磁危险范围, 这就是发电机电压均衡准则未得到满足所带来的恶果。

5 结语

在缺乏水电资源但用户自备应急电源众多的地区, 可以按分布式发电的思路, 将用户自备应急柴油发电机组组合起来为地方电网黑启动服务。

发电机的外部等值负荷呈现电容性时会出现自

励磁。要想规避自励磁, 必须避免发电机无功功率呈电容性。电网无功功率感性成分占优是规避自激磁的必要条件, 发电机电压均衡是规避自激磁的充分条件。这里充分条件很敏感, 对黑启动服务组合运作网络进行电压/无功调控时, 在保证充分条件得到满足上, 不可掉以轻心。

为了使电网无功功率感性成分占优, 通常要鼓励参加黑启动服务组合的用户, 在黑启动服务过程中自身多用电。因此, 将用户自备应急柴油发电机组组合起来, 为地方电网黑启动服务, 是一件互利双赢的好事。

参考文献

- [1] Neto A C, da Silva M G, Rodrigues A B. Impact of Distributed Generation on Reliability Evaluation of Radial Distribution Systems under Network Constraints[A].in: 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems[C]. KTH, Stockholm (Sweden): 2006.1-2.
- [2] KIM T E, KIN J E. Consideration for the Feasible Operating Range of Distributed Generation Interconnected to Power Distribution System[A]. in: Proceedings of 2002 Power Engineering Society Summer Meeting[C]. Chicago, IL, USA. Piscataway, NJ, USA: 2002. 42-48.
- [3] 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[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (13): 50-54.
- [4] GAO Yuan-wang, GU Xue-ping, LIU Yan, et al. Automatic Derivation and Assessment of Power System Black-start Scheme[J].Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (13): 50-54.
- [5] 危雪, 周云海. 黑启动中的自励磁判据及仿真[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2005, 27 (3): 201-204.
- [6] WEI Xue, ZHOU Yun-hai. Self Excitation Criterion in Black Start and its Simulation[J]. Journal of China Three Geoges Univ, (Nature Science), 2005, 27 (3): 201-204.
- [7] 黄家裕. 同步电机基本方程和短路分析[M].北京: 水利电力出版社, 1993.
- [8] HUANG Jia-yu. Basic Equations and Short Circuit Analysis of Synchronous Electrical Machine[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1993.
- [9] 郭志忠. 电力网络解析论[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [10] GUO Zhi-zhong. Analysis of Electric Power Network[M]. Beijing: Science Press, 2008.

收稿日期: 2009-02-12; 修回日期: 2009-04-20

作者简介:

徐建楠(1980-), 男, 在职硕士, 从事电力系统安全运行分析和研究;

柳进(1958-), 女, 博士, 副教授, 从事电力系统分析与控制和高峰预测及优化调度。E-mail: liujin@hit.edu.cn