

直流配电网拓扑结构与接纳分布式能源能力研究

直流配电网具有友好接纳分布式能源（DER），提高供电质量及节能降耗等优点，在未来城市电网、微电网等领域有良好的应用前景。合理的拓扑结构是直流配电网研究首先需要解决的问题。通过建立网络功率分布计算模型，在对比分析了直流配电网不同拓扑结构特点及DER接入能力的基础上，提出了网格式直流配电网的拓扑结构，并根据功率分布特点优化为分层分区的网状结构框架。仿真计算结果证明了网格式结构的电网接纳DER的能力优于辐射型和环网结构的电网。

刘连光 蒋智化 刘自发 张晓晴/华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室

0 引言

随着电力电子技术的发展、分布式能源（Distributed Energy Resource, DER）的大量接入以及直流负荷的迅速增长，直流配电网研究及应用受到了工程界和学术界的广泛关注。直流配电网在输送容量、可控性及供电质量等方面比交流配电网性能更好，可有效提高电能质量，减少电力电子换流器的使用，降低电能损耗和运行成本，协调大电网与DER接入之间的矛盾，充分发挥DER的价值和效益^[1,5]。应时研究直流配电网的基础理论、关键技术以及开展直流配电网示范工程的建设具有重要意义。

但由于直流配电网配送电能的形式不同以及交直流电气设备运行特性的差异，直流配电网网络结构与传统三相交流配电系统网络结构会有很大的区别。现有文献参照交流配电系

统，给出的直流配电网拓扑结构分为放射状、环状和两端供电等型式，但并未论证各自的适用规模、场所以及直流配电网技术特点与网络结构模式的相关性问题^[6,7]。为适应新能源接入及各类负荷的用电需求，未来直流配电网应满足以下基本要求：能够就地平滑接入各种DER以提高能源资源的利用效率；灵活地进行功率的双向流动和控制，以实现全网的供需互动；保障安全可靠的供电，为用户提供高质量电能^[8]。直流配电网采用的拓扑结构形式必须满足这一要求。

直流配电网采用交流配电网的辐射型拓扑结构或“环网结构、开环运行”的模式^[9]，很难适应规模化DER接入条件下的配电网供电要求，提出直流配电网网络拓扑结构以及分析、计算相应结构网络接纳DER的能力，是直流配电网研究首先需要研究、解决的问题。在对比分析了直流配电网不同拓扑结构特点及DER接入能力的基础上，提出了网格式直流配电网的拓扑结构以及分层分区的优化方案，证明了网格式结构的电网接纳DER的能力优于辐射型和环网结构的电网。

1 直流配电网结构及特点

目前国内外有关直流配电网及其工程化应用的研究均处于起步阶段，尚未形成系统的直流配电网结构形式。目前直流配电系统建议的拓扑结构有辐射形、环形和网格式结构，如图1~3所示。



刘连光/教授

关键词/Keywords

直流配电网 ·
功率分布 ·
分布式能源 ·
电压分布 ·

国家电网公司专题课程（SGCC-MPLG019-2012）资助项目。

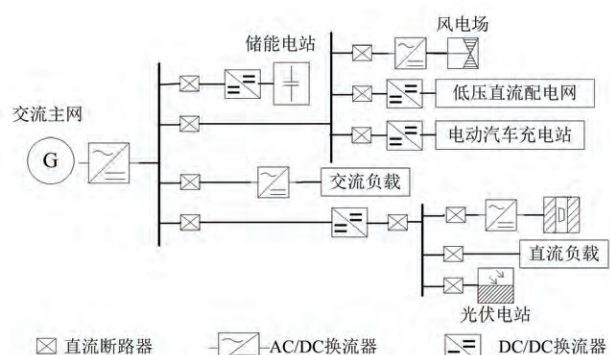


图1 辐射型直流配电网结构

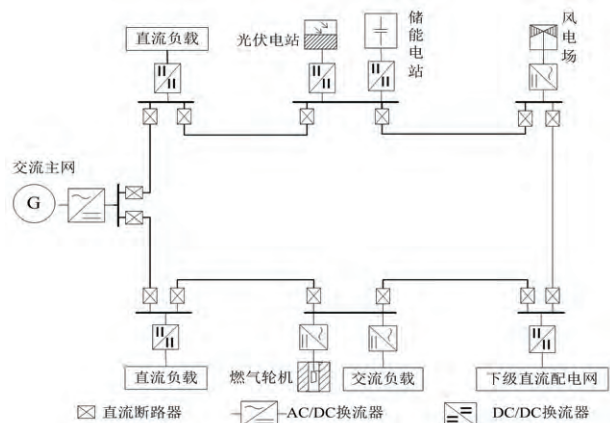


图2 环形直流配电网结构

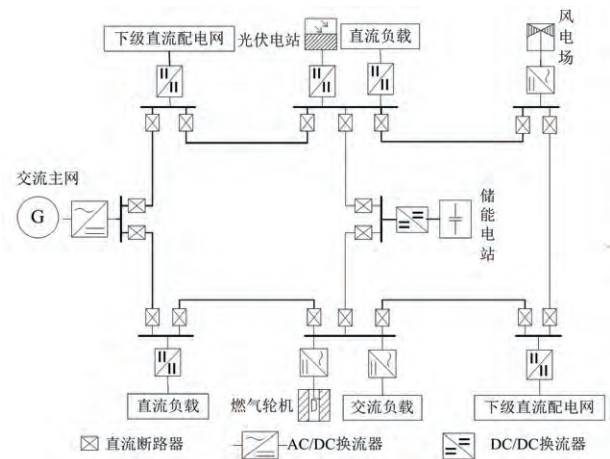


图3 网格式直流配电网结构

主网电源、DER与负荷通过AC/DC、DC/DC变换装置接入。其中，与主网连接的VSC换流器具备能量双向流动的功能，以使直流配电网与主网间进行电能交换，保证配网的功率平衡。各种DER及负荷的接入，需要根据实际选合适类型的AC/DC、DC/DC换流设备。网络的连接或隔离采用具备自动切换功能的直流开关设备（直流断路器或隔离开关），便于实现网络的自愈控制。

通常来说，辐射状网络供电可靠性相对较低，但故障识别及保护控制配合等相对容易；网状配电网的供电可靠性相对最高，但故障识别及保护控制配合等也相对困难。直流配电网可以根据供电可靠性、供电范围（距离）及投资等实际工程需要，采用不同的电压等级和拓扑结构进行基于DER接入的直流配电网拓扑设计。

为适应大量DER接入交流配电网带来的双向潮流问题以及电能质量、短路容量、保护策略、可靠性等各方面的影响，国内外学者提出闭环结构运行的主动配电技术[10]，而适应规模化DER接入的直流配电网网络结构模式尚未得到学界的关注。本文认为，对规模化DER接入的中压直流配电网，网络结构宜采用复杂环网或网状网络。其中，网状直流配电网的优点为：

（1）与辐射型网络相比，网格式结构的最主要的特点是具有极高的供电可靠性；电网损耗较低且具有更好的电压分布，降低了线路及变压器设备的负载率，具有较强的DER吸纳能力。

（2）网状结构利于发挥直流配电网中电力电子设备的功率调控作用，便于DER和储能电源之间功率的双向流动与控制，实现各类电源在配网中的优化配置。

（3）网格式结构将导致故障保护的复杂化，在大量DER接入条件下保护的技术实现更为困难。但未来直流配电系统保护发展方向为基于通信技术的差分类保护^[11,12]，该类型保护配置对网络结构形式无特殊要求。

（4）短路电流大是网格式结构的缺点。但由于各类电源均经过AC/DC或DC/DC换流器接入直流配电网，换流器对短路电流的限制作用可降低网格式电网短路电流的数值。

2 直流配电网功率分布

2.1 分布式能源的接入

分布式能源的基本构成是：分布式发电（Distributed Generation, DG）、分布式储能（Electrical Energy Storage, EES）和可控负荷（Controllable Load, CL）等^[10]。电源形式包括光伏、风力发电、燃料电池和燃气涡轮机等。不同的DER容量、可控程度和输出电源性质存在差

异, 导致与直流配电网的接口换流器结构形式不同。因而需要根据实际情况对DER进行优化配置和协调控制。一般认为, 中小容量的DG不正面参与网络电压调节, 同时清洁能源接入宜采用定功率控制方式, 故稳态条件下可认为DER出力保持恒定, 不随节点电压变化而改变。配电网中负荷类型繁多, 较难建立精确的负荷模型, 为便于研究, 稳态条件下各节点负荷可采用定功率静态模型或恒阻抗模型。直流配电网控制方式有主从控制、下垂控制等^[13,14], 由于稳态条件下控制方式对系统功率分布影响不大, 本文直流配电网研究采用主从控制方式, 与交流主网联结的接口换流器设为定直流电压控制模式, 承担全网功率平衡的任务。

2.2 功率分布

DER接入直流配电网后, 将对系统功率分布、网络损耗和电能质量等各方面产生影响。由于电能质量和网络损耗是配电网的关注点, 本文主要分析DER带来的直流配电网电压分布及网络损耗问题。

2.2.1 电压分布

以 n 节点直流配电网为例, 在单极运行方式下, 可建立直流电网的网络方程, 节点电流或功率与节点电压关系

$$\dot{I} = G\dot{V} \quad (1)$$

$$\dot{P} = \text{diag}[\dot{V}_i] \dot{I} = \text{diag}[\dot{V}_i] G \dot{V} \quad (2)$$

式中, G 为 $N \times N$ 阶节点电导矩阵; I 为 $N \times 1$ 维节点注入电流矢量; V 为 $N \times 1$ 维节点电压矢量; P 表示节点注入功率。

将 G 求逆, 以节点电阻矩阵表示的节点电压方程为

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_j \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & \cdots & R_{1j} & \cdots & R_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{j1} & \cdots & R_{jj} & \cdots & R_{jn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n1} & \cdots & R_{nj} & \cdots & R_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_j \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\dot{I}_n = [\dot{P}/\dot{V}] \quad (4)$$

由式(3)可知, 尽管电压是直流电网唯一的功率平衡指标, 但系统电压由于线路电阻的存

在, 是不均衡分布的, 因而直流配电网电压调节是一个局部概念。节点电阻矩阵的元素包含全网的信息, 因此网络任意节点电源注入功率(或电流)以及网络结构参数的变化都将改变全网电压分布。

在直流网络中, 各节点间的电位分布差异是网络功率或电流流动分布的决定因素。为评价电网电压均衡程度和电压控制效果, 本文提出用系统各节点电压与全网节点电压分布均值的差值的平方和作为系统电压分布不均衡度的评价指标, 用 ε 表示, 电压分布不均衡度为

$$\varepsilon = D(V) = E(V^2) - E(V)^2 \quad (5)$$

式中, V 为节点电压向量; $E(V)$ 为节点电压均值, 即期望值; ε 越小表示电压分布越均衡。

2.2.2 网络损耗

直流配电网控制要求在维持系统电压水平的前提下, 优化系统功率分布以降低网络损耗, 网络支路功率及损耗方程为

$$P_{ij} = \frac{V_i(V_i - V_j)}{R_{ij}} = \frac{V_i \Delta V_{ij}}{R_{ij}} \quad (6)$$

$$\Delta P_{ij} = \frac{P_{ij}^2}{V_i^2} R_{ij} = \frac{\Delta V_{ij}^2}{R_{ij}} \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可知, 节点电压分布与网络参数共同决定了支路损耗的大小。而由式(3)可知, 网络电压分布由各节点电源注入电流及网络参数决定。故通过优化网络结构或DER输出功率, 可以改善系统电压分布进而降低网络损耗。

由式(5)和式(7)可知, 网络损耗与电压分布不均衡度均由网络各节点电压差值决定, 表明网络损耗与电压分布不均衡度之间具有较高的相关性。直流配电网运行时, 在满足电压偏差要求的前提下, 可将电压分布不均衡度作为衡量系统网络损耗的重要指标。

3 分层分区的网格式结构

与交流系统不同, 直流电网在各节点注入功率不变的条件下, 网内潮流的自由分布按电阻分布, 即是最优分布, 因而不存在功率调整

与优化问题。但2.2.2节的分析表明，在大量DER接入的条件下，通过协调控制DER输出功率，减少有功在网络中的传输，可以实现系统电压均衡分布及降低网络损耗。这一特点类似

于交流系统无功功率分层分区、就地平衡的概念。根据这一特点，直流配电网网格式结构可采用图4分层分区形式，以利于系统功率控制及优化。

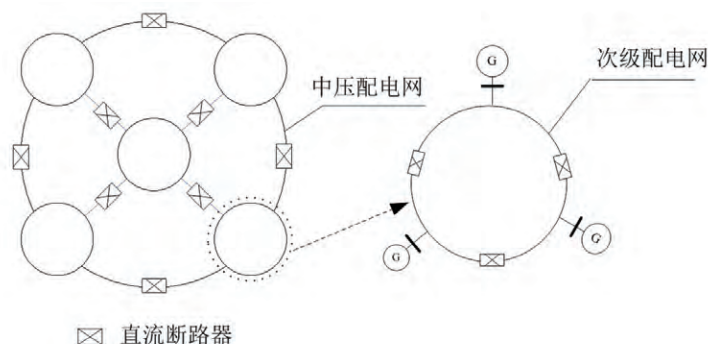


图4 分层分区网格式结构框架

图4中，中压直流配电网实质为多个环形次级电网互联的网状网络。各类DER、负荷就地接入次级配电网，DER类型、容量应优化配置，运行时尽可能满足供需平衡。若次级配电网之间电压等级一致，采用直流断路器互联；否则采用直流变压器联结，实现功率输送或双向功率交换控制。分层分区的网格式结构具有如下特点：第一，具备高可靠性，几条线路同时被切断不会失去负荷；第二，相邻次级配电网可以通过线路实现双向功率流动，便于DER接入和提供应急备用；第三，利于实现功率的分层分区优化控制，降低网损以及提高电压质量。

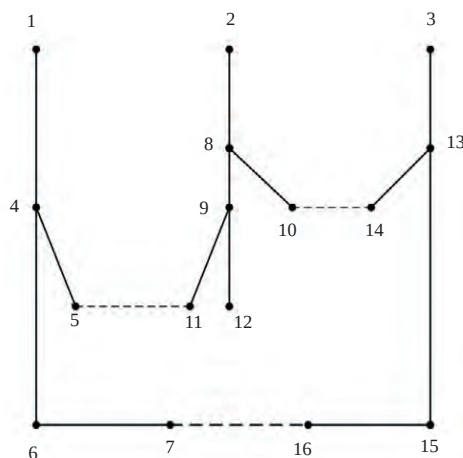


图5 IEEE 16节点配电系统

4 直流配电网接纳DER能力分析

由上文分析，直流配电网网络参数、各节点电源注入功率对网络功率分布产生影响。反之，电网功率分布特点也可反映网络参数变化条件下的直流配电网接纳DER的能力。本文通过案例仿真，比较分析不同网络结构对直流配电网接纳DER的影响。

4.1 算例模型

IEEE 16节点的交流系统算例如图5所示^[15]，算例的基准容量为100 MV·A，基准电压为23 kV。

图5电源节点1、2、3的电压幅值相同，合并为一个电源节点，考虑DER接入，增加两个DER支路，改造后的网络如图6所示。改造的基准容量不变，基准电压取23 kV电压的峰值30 kV，DER由节

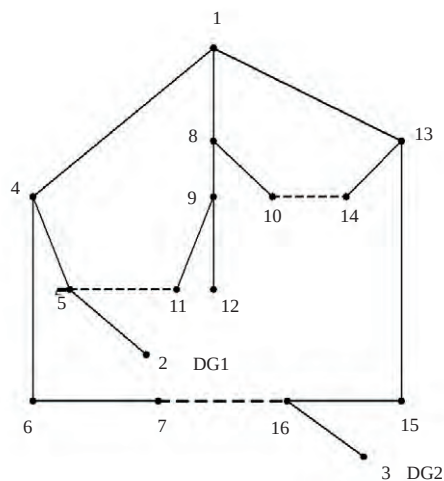


图6 16节点直流配电系统

点2和3接入电网，电网参数及负荷数据见下表。

表 16节点直流配电网参数表

支路	支路电阻/ Ω	末节点负荷/MW
1-4	0.396 75	2.0
4-5	0.423 20	3.0
4-6	0.476 10	2.0
6-7	0.211 60	1.5
1-8	0.581 90	4.0
8-9	0.423 20	5.0
8-10	0.581 90	1.0
9-11	0.581 90	0.6
9-12	0.423 20	4.5
1-13	0.581 90	1.0
13-14	0.476 10	1.0
13-15	0.423 20	1.0
15-16	0.211 60	2.1
5-11	0.211 60	
10-14	0.211 60	
7-16	0.476 10	
5-2	0	-2.5
16-3	0	-1.8

4.2 仿真分析

采用牛顿-拉夫逊法在Matlab仿真环境下对算例进行潮流计算。不考虑DER接入的逆功率限制，DER渗透率分别按网络负荷总量的10%、20%、50%、100%、120%共计5个档次考虑，取节点2、节点3的DER注入功率比例为，据此分析网络结构改变条件下的损耗及电压分布变化。

4.2.1 网络结构变化对网损的影响

直流配电网开环（图6虚线全部断开）、闭环（图6仅7、16节点连接）和网状（图6虚线全部闭合）三种状态运行条件下的功率分布计算结果如图7所示。可以看出，直流配电网的网损从开环、闭环到网状结构依次降低。特别值得注意的是：开环、闭环与网状结构条件下网损曲线的斜率依次减小，这表明网状结构对降低网损有明显作用，网状结构对DER接入的敏感性较低，有较强的吸纳DER的能力。

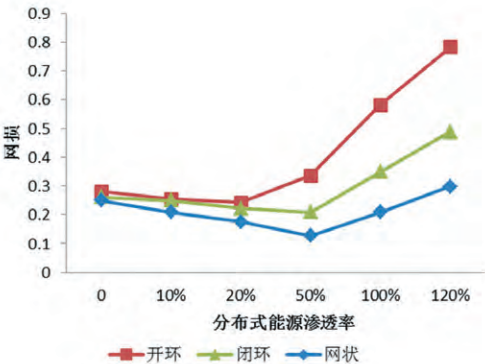


图7 网络结构变化对网损的影响

4.2.2 网络结构对电压分布的影响

开环、闭环和网状结构的全网电压分布不均衡度的计算结果如图8所示。

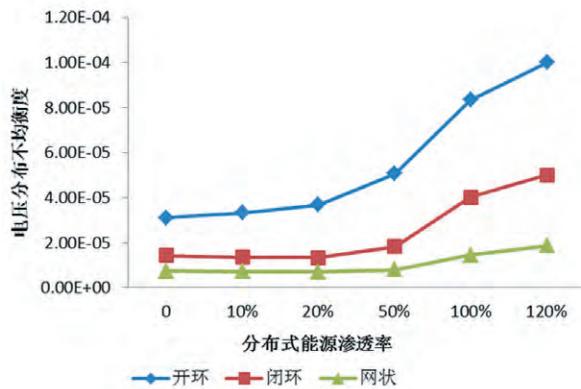


图8 网络结构对电压分布不均衡度的影响

可以看出，电压分布不均衡度从开环、闭环到网状网络结构依次降低，这说明随着网络节点互联程度的增加，网络电压分布情况逐步改善，表明网状结构的直流配电网有较强的DER吸纳能力。

图9为全网电压分布不均衡度随DER渗透率增长变动与网损曲线变动趋势的比较。3条曲线的变动趋势相同，均有一个递减再转至递增的过程。但在DER渗透率较低时，不均衡度曲线与网损曲线变动趋势差异较大，表明此时电压分布受网络参数的影响较大；在DER渗透率高于50%后，不均衡度曲线与网损曲线变动趋势开始吻合，表明此时DER渗透率对电压分布的影响增大。上述仿真结果与2.2小节的分析结论是一致的。因此，电压分布不均衡度指标在一定程度上可用来评估网损的大小。

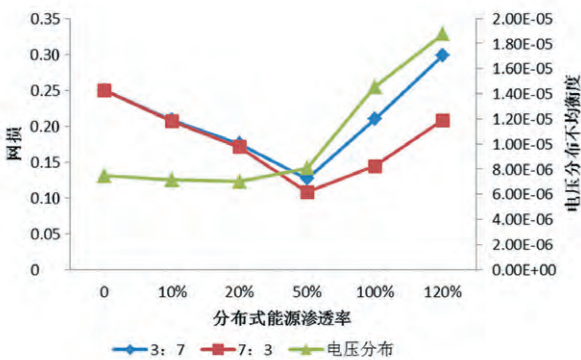


图9 电压分布不均衡度曲线与网络损耗的变动趋势比较

5 结束语

(1) 提出网格式结构直流配电网, 并对其技术特点进行了分析。通过对网络电压分布、网络损耗数学模型的分析, 进一步提出分层分区的网格式结构框架及运行控制特点。

(2) 计算直流配电网稳态功率是直流配电网规划设计以及安全运行分析的基础, 本文建立了直流配电网节点电压和网络损耗模型。针对直流配电网的电压分布的不均衡性及电压调节局部性特点, 给出了电压分布不均衡度的定义, 定义的电压分布不均衡度可作为控制电压及评估网络损耗的参数。

(3) 本文针对开环、闭环和网状结构直流配电网在DER渗透率不同条件下的网损和电压分布计算结果的对比分析表明, 电压分布均衡性与网损间存在较高的相关性和网格式配电网接纳DER的能力很强。

参考文献

- [1] 崔福博, 郭剑波, 荆平, 等. 直流配电技术综述[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 556-564.
- [2] 许挺, 江道灼. 兼容分布式能源的直流配电系统研究综述[C]. 中国电机工程学会第十一届青年学术会议论文集. 2010: 695-699.
- [3] Dastgeer F, Kalam A. Efficiency comparison of DC and AC distribution systems for distributed generation[C]. Proceedings of Australasian Universities Power Engineering Conference, September 27-30, 2009, Adelaide, SA, Australia: 1-5.
- [4] Starke M R, Olbert L M, Ozpineci B. AC vs DC distribution: a loss comparison[C]. Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, April 21-24, 2008, Chicago, IL, USA: 1-7.
- [5] Starke M, Li F X, Tolbert L M, et al. AC vs DC distribution: maximum transfer capability[C]. Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, July 20-24, 2008, Pittsburgh, PA, USA: 1-6.
- [6] 江道灼, 郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 98-104.
- [7] 王丹, 毛承雄, 陆继明, 等. 直流配电系统技术分析及设计构想[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 82-88.
- [8] 肖立业, 林良真, 徐铭铭, 等. 未来电网-多层次直流环形电网与“云电力”[J]. 电工电能新技术, 2011, 30(4): 64-69.
- [9] 姚莉娜, 张军利, 刘华, 等. 城市中压配电网典型接线方式分析[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(7): 26-29.
- [10] 范明天, 张祖平, 苏傲雪, 等. 主动配电系统可行技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 12-18.
- [11] 薛士敏, 陈超超, 金毅, 等. 直流配电系统保护技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3114-3122.
- [12] IEEE Standard 1709, IEEE recommended practice for 1 kV to 35 kV medium-voltage DC power systems on ships[S]. 2010, 9.
- [13] 栾会, 王丹, 毛承雄, 等. 直流配电系统的运行与控制[J]. 水电能源科学, 2012, 11(9): 161-164.
- [14] 李亚楼, 穆清, 安宁, 等. 电网模型和仿真的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4): 127-135.
- [15] Civanlar S, Grainger J J, Yin H, et al. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(7): 1217-1223.

(收稿日期: 2015-05-26) EA

作者简介

刘连光 (1954-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电网安全运行与灾变控制、电力系统规划, 直流电网。

蒋智化 (1976-), 男, 讲师, 在职博士研究生, 主要研究方向为电力系统规划、直流电网。