

# 加强电网规划，防止大规模停电

朱英杰，陈庭记，李 晨，金淋芳

(南京供电公司，江苏 南京 210018)

**摘 要:** 通过对南京停电事件的分析，指出南京电网存在暂态电压稳定问题，使用“电力系统分析综合程序【PSASP】7.1 版”对 2016 年南京电网进行了深入的计算，仿真中考虑了电动机模型的影响，结果表明，南京电网在线路故障的情况下有发生电压崩溃的现象，需要进行动态无功补偿，安装 SVC 可以使系统电压符合要求。最后，针对南京电网存在的电压稳定性问题，提出了改善电压稳定性的具体措施和建议。

**关键词:** 受端系统；SVC；暂态电压；无功

## 1 事件概况

2014 年 5 月，南京地区某 220kV 线路发生故障，事后根据保护录波图分析，该 B 相首先发生接地故障，约 30ms 后故障消失，140ms 后发展为三相短路故障，451ms 后距离Ⅱ段动作出口，开关三相跳闸。

故障发生后 0.3s 某电厂发电机组（2×660MW）切机，至次日上午才缓慢恢复供电；受此次故障影响，相邻火车站内部 10kV 侧进线开关失压保护动作跳闸，导致站台区域照明短时失电；两列列车延时发车。该地区周边少部分低压客户亦受压降影响，部分用户低电压脱扣器动作。初步统计，开关低电压脱扣器动作导致受影响负荷约 21 万千瓦，其中低压负荷（0.4kV）约 3 万千瓦，中压负荷(10.5kV)约 18 万千瓦。此外，南京主城区受此影响，照明瞬时闪动。

## 2 原因分析

### 2.1 南京电网基本情况

南京是长江三角洲承东启西的重要中心城市，人口密集，重要电力客户多；南京供电公司担负着南京市 6597km<sup>[2]</sup>的供电任务。2014 年，南京实现全社会用电量 470.50 亿千瓦时；完成售电量 393.41 亿千瓦时；最高网供负荷 853.9 万千瓦，其中本地电源提供为 540.7 万千瓦，约占 63.32%，其余为区外来电，

南京电网目前已形成 500kV 跨长江双环网、220kV 分三个片区（宁北、东龙、廻上分区）环网运行、110（35）kV 辐射互联、主城区 10kV 双环

网、中心城区 10kV 格式环网为主的架构。目前，南京电网已实施分层分区运行，以 500kV 变电站为核心，形成了三个 220kV 分区电网。正常情况下各分区电网之间解环运行，各自通过相关的 220kV 中心站、中间站、终端站向下一级配电网络 and 用户供电。

### 2.2 受端系统

南京电网是个典型的受端系统，电源远离负荷中心，负荷中心因环保等限制条件，用较密集的电力网络和这些电源联接在一起，通过接受外部及远方电源输入的有功电力和电能，实现电的供需平衡。

随着用电负荷的增加，在电网建设没有同步发展的情况下，区域间远距离输电线路输送容量不断增大，空调负荷、感应电动机等负荷比重的增加，受端电网对外来电力的依赖程度不断提高，受端电网电压稳定问题日益突出。近年来，南京区外来电所占比例逐年递增，如表 1。

表 1 2011-2014 年南京电网最高负荷时电源来源对比

时间	本地发电		关口受进	
	电量/(万 kW)	占比/%	电量/(万 kW)	占比/%
2011.8.18 14:10	521.1	73.84	184.6	26.16
2012.7.30 12:55	506.9	67.4	246.4	32.6
2013.8.15 12:40	562	67.3	272.7	32.7
2014.7.22 12:35	540.7	63.32	313.2	36.68

近年来，由于环保等要求，随着南京主城区电厂逐步关停，总体上，随着负荷的增长，南京地区对外来电力的依赖将进一步加重。

国内外多次的电力事故及多年的运行表明，受

端系统承受多重性故障的能力很差，难以防止全网性大停电事故。当受端系统外送电源通道上电源容量过分集中，因线路故障失去了较大的传输能力时，将会造成其余通道主要输电线路的严重过载，造成线路连锁跳闸，势必造成负荷中心丧失大量外电源，如果受端网络不强或缺乏足够的近区电源支持，受端系统的严重低电压，很可能进一步扩大事故，直至系统崩溃。

### 2.3 停电原因分析

大致过程如下：220kV 线路短路故障，低电压导致接到某变电站 220kV 母线的电厂发电机辅机在低电压下跳闸，机组失去动力电源，最终导致电厂两台发电机组切机；随着京电厂发电机组的切除，由于负荷点缺乏足够的动态无功支撑，导致了低电压的出现，引起受端电压下降，变低的电压又使电动机型的负荷吸收更多的无功功率，无功平衡受到破坏，并引起线路压降，使电压更进一步地降低，诱发了暂态电压稳定，使得电压振荡。

由以上分析可见，停电发生的根本原因是系统动态无功不足。虽然南京电网低压侧并联电容补偿多，但不具备支撑特性，高压侧没有 SVC 等动态无功电源，根据文献[1]：“南京重负荷地区无功储备不足，缺乏事故情况下的动态无功支持”<sup>[1]</sup>。此次停电充分说明了这一点。随着南京电网受电功率和受电比率的不断增加，无功电源不足，特别是动态无功电源不足将日趋严重，由于电网缺乏必要动态无功功率支撑，一旦受到干扰，系统很容易出现无功不足，从而引起暂态电压稳定问题。

## 3 南京电网暂态电压稳定研究

### 3.1 研究方式和条件

#### (1) 负荷模型

电压稳定与负荷关系紧密，仿真中负荷模型和参数是否合适将直接影响到结果的可信度和准确性。

现在我国电网规划、调度中使用较多的是静态负荷模型，感应电动机由其中的恒定功率部分来模拟，使用中它具有一些局限性，例如不能表示电压波动幅度较大时无功和电压高灵敏度的非线性关系等；尤其是采用静态负荷模型分析电压稳定得出的结论偏于乐观。

目前，负荷中心的空调负荷所占比例越来越

大，而且随天气变化其数量增减剧烈，难以预测，故障后对电网的电压恢复构成较严重的危险；电网中工业电动机负荷占的比率不小，启动电流较大，对无功的需求很大；随着电力电子技术的广泛应用，很多负荷对电压的灵敏度降低，类似恒定功率性质，不利于电压的恢复。

从电力系统负荷实际构成来看，感应电动机是电力系统负荷的主要成分，根据资料，美国约 57% 的电力负荷是电动机；根据文献[1]研究，江苏电网某个典型变电站以感应电动机为代表的动态负荷高达 70%<sup>[1]</sup>；福建电网负荷中电动机比例高达 36%~54%<sup>[2]</sup>。因此，负荷模型中需要适当考虑一定比例的电动机，有利于更好地模拟负荷动态特性。

PSASP 软件中，感应电动机模型采用了三阶模型，该负荷模型基于电动机的实际物理模型，包括了转子动态、忽略了定子电磁暂态过程，在一定程度上可以模拟电动机的启动、减速和停转状况<sup>[3]</sup>。下面对电压暂态稳定的研究，考虑到负荷中电动机所占比例越来越大，并参考相关资料，江苏电网负荷模型采用 50% 恒定阻抗、50% 电动机构成的感应电动机动态模型，其他各省均采用负荷静特性模型。

#### (2) 发电机模型

发电机模型采用次暂态过程的  $E_q'$ 、 $E_d'$  恒定，并且考虑励磁调节系统，不考虑调速系统的作用。

#### (3) 稳定判据

按照《电力系统安全稳定导则》及《国家电网公司电力系统安全稳定计算规定》，暂态电压稳定判据为：故障消除后，主要枢纽变电站的母线电压能够恢复到运行允许范围，母线电压低于 0.75(p.u.) 的持续时间不超过 1.0s<sup>[4]</sup>。

#### (4) 仿真计算工具

采用中国电力科学研究院“电力系统分析综合程序 (PSASP 7.1)”作为本次研究的计算工具，计算分析时采用江苏电网 2016 年规划网络夏季大方式。

### 3.2 短路故障情况

设置了东龙分区内的四种故障情况，观察点为东龙分区内 220kV 南站变、晓庄变、雨花变、钟山变、安品街变、南站变、500kV 东善桥 220kV 母线。结果如表 2 和图 1~3 所示。

表 2 故障设置情况

故障	故障描述	仿真结果
1	东善桥至三汊湾一回 500kV 线路三相永久接地短路, 0.1s 切除故障	电压崩溃
2	东善桥#1 主变 220kV 侧出口三相永久接地短路, 0.1s 切除故障	电压崩溃
3	东善桥至大定坊 220kV 侧线路大定坊侧三相永久接地短路, 0.1s 切除故障	电压稳定

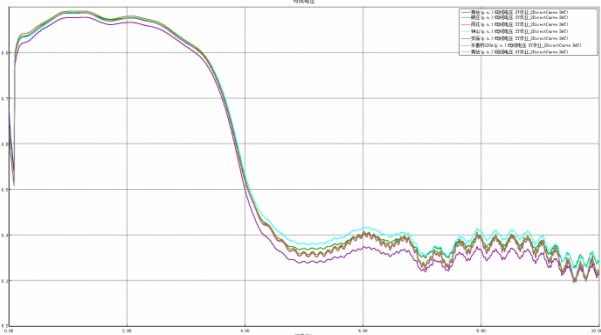


图 1 故障 1 仿真结果

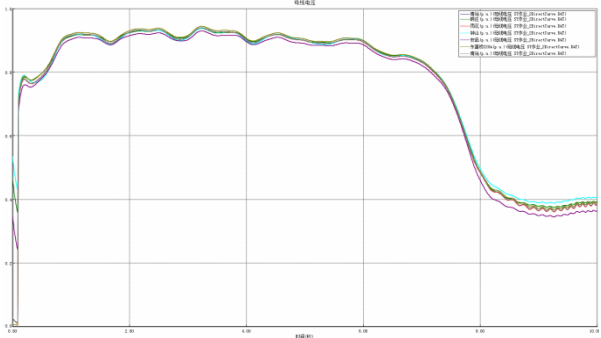


图 2 故障 2 仿真结果

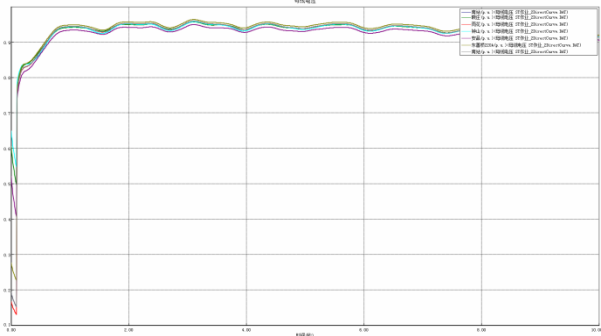


图 3 故障 3 仿真结果

考虑分别在 220kV 南站、220kV 安品街变电站加装 150Mvar SVC 装置, 故障 1、故障 2 加装 SVC 后的仿真结果如图 4-5。

以上工作表明, 采用感应电动机负荷模型时, 南京地区的暂态电压稳定问题十分突出; 南京电网在短路故障时有可能发生电压崩溃, 加装 SVC 装置可以提供较好的动态无功支撑, 改善整个分区电网的动态安全水平, 减少电压波动, 提高扰动后母

线的最低电压和稳态电压, 缩短系统电压恢复时间, 对故障后电压恢复过程有显著作用, 尤其是电动机受荷时更明显。随着电网的发展, 分阶段安装是一个可行的方案。

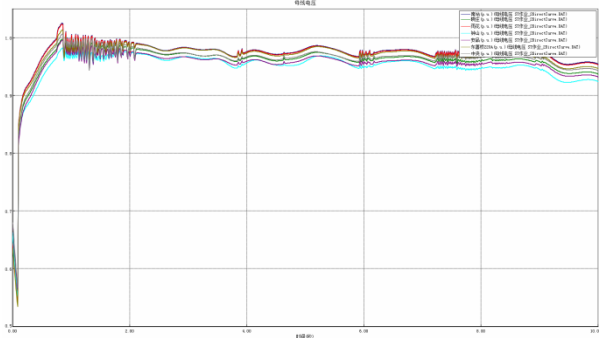


图 4 加装 SVC 后故障 1 仿真结果

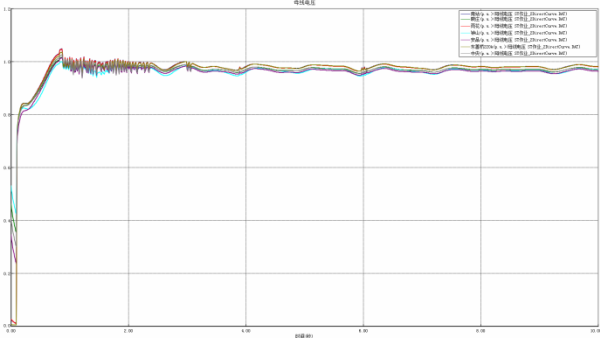


图 5 加装 SVC 后故障 2 仿真结果

4 对策及建议

4.1 加强南京电网的电源建设

电源建设滞后于负荷增长的局面在南京长期存在, 夏季高峰时即使南京电网机组长期满负荷运行, 尚不能满足《电力系统安全稳定导则》中“系统应有足够的备用容量, 备用容量应该分配合理, 并有必要的调节手段”<sup>[4]</sup>的要求, 而足够的系统备用容量是应付电网突发事件、防范大面积停电的物质保证。只有加强本地支撑电源的建设, 合理控制受电比例, 留有充足的备用容量, 才能提高电网的抗风险能力。

对于南京这一大型都市受端电网, 应积极争取并消纳市外来电, 缓解供电紧张的矛盾, 又要考虑到受端电网的供电可靠性, 加强本地电源建设。从南京电网的结构来看, 已经构成了 500 kV 双环网, 具备了较强的受端网络, 因此紧缺的是支撑电源, 以提供事故情况下的有功、尤其是无功支持, 提高系统的暂态电压水平。

4.2 加强南京电网的动态无功支撑

由于能源、环保及土地资源的制约，中心负荷区电厂越来越少，区外输电比例越来越大；南京电网中目前没有安装动态无功补偿设备，动态无功支撑日益不足，而无功是不能靠远距离传送的；另一方面，电网中并网电容器数量巨大，在电压降低时发出的无功成平方关系下降，会进一步恶化系统的电压情况；南京电网 220kV 电网分层分区运行，各分区电网的电压支撑能力和联络能力进一步减弱。随着用电负荷和受电比率(已达总用电负荷的 35% 以上)的不断增长，电网内缺乏动态无功电源支撑日趋明显。

无功电源的合理配置，对电力系统的安全稳定运行有重大影响。尤其是在受进电力比重较大的负荷中心，由于电网参数和负荷特性的非线性，在发生系统大扰动后，无功需求可能激增。必须有足够的动态无功调节储备，保证在系统发生大的扰动后有足够的无功发出，才能有效支撑电网枢纽节点的电压恢复，避免因电压恢复困难而引起系统电压缓慢或快速崩溃。

因此，电网规划既要考虑有功功率的平衡，还要充分考虑受端电网的电压支撑，保证其在系统故障情况下有充分的动态无功供给，改变原来无功规划中静态无功平衡、动态无功基本不涉及的思路。

#### 4.3 统一规划管理继电保护和安全自动装置

厂网分开后，电网运营商和发电商甚至电网用户侧均是各自规划、设计和建设继电保护和安全自动装置，缺乏全局性的考虑，没能统一安装、统一管理、统一配置和整定。

比如，目前发电机保护整定值各个发电厂各自为政，发电厂大机组与系统有关的保护如失步、失磁保护和低频、低压保护等的管理工作还较薄弱，甚至一些电厂虽然按照电网要求装设了这些保护装置，但是实际运行时并未启用。随着厂网分开，应该加强对发电厂与电网安全有关部分的保护和自动装置的监管、加强与发电厂之间的必要信息沟通。

以此次南京电网停电为例，根据《GB/T 14285-2006 继电保护和安全自动装置技术规程》4.6.2 条<sup>[5]</sup>，220kV 线路需配置双套全线速动保护，保证快速切除故障。故障线路虽然配置了分相电流差动保护，但并没有启用，造成故障切除时间较长。另外，该线路为混架线路，线路全长 2.3 km，后备保护配合困难，应该启用分相电流差动

保护，快速切除故障。

#### 4.4 重视低电压切负荷装置的配置

电压崩溃最根本的原因是无功的不足，通过切负荷来保持系统电压稳定性是最直接有效的方法<sup>[6]</sup>。

空调、感应电动机等负荷在电压降低时无功消耗增加，导致电网无功功率缺额增大与电压进一步下降的恶性循环，最终可能导致配电网系统崩溃，从而造成大面积停电事故。在电压降低后延时切除负荷将大大优于当感应电动机在电压进一步下降时自行停转，有利于防止电压崩溃。有必要将低电压切负荷装置的安装放在建立系统防线的高度进行研究，扩大安装的范围。

### 5 结束语

未雨绸缪，研究电网特点，早做准备，才能保证电网的稳定运行，防止大面积恶性停电事故发生。可通过加强受端电网电源接入、动态无功配置、配置低电压切负荷装置等措施，降低电网发生大停电的风险。

电压稳定与负荷密切相关，电动机在负荷中占很大比例，仿真时需要考虑其影响。负荷模型是电压稳定问题的重要元素，建议对南京电网的动态负荷模型进行深入研究，建立与电网实际运行相符的电网动态负荷模型。

#### 参考文献：

- [1] 安宁,周双喜,朱凌志,等.负荷特性对江苏电网电压稳定性影响的仿真分析[J].中国电力,2006,39(8).
- [2] 黄文英,方朝雄,李可文.福建电网在线负荷综合建模系统[A].福建省电机工程学会第七届学术年会[C].2007.
- [3] 陆超,崔文进,夏祖华,等.中国重大经济中心城市电网的暂态电压稳定问题与治理[A].第四届输配电技术国际会议[C].2003.
- [4] DL755-2001, 电力系统安全稳定导则[S].
- [5] GB/T 14285-2006, 继电保护和安全自动装置技术规程[S].
- [6] Feng z, Ajjarapu V, Maratukulam D J. A practical minimum load shedding strategy to mitigate voltage collapse [J]. IEEE Trans on Power System, 1998, 13(4).

#### 作者简介：

朱英杰（1976-），男，山东菏泽人，高级工程师，从事电

力系统规划分析方面的研究工作；

陈庭记（1975-），男，江苏泰州人，高级工程师，从事电  
网规划工作；

李 晨（1980-），男，江苏溧阳人，高级工程师，从事电  
网规划工作；

金淋芳（1979-），男，浙江遂昌人，高级工程师，从事运  
营监测工作。