DOI: 10.7667/PSPC171440

# 大机组降压运行对分区电网短路电流的影响

谭玉东[1]，蔡 晔[2]，谢欣涛[1]，李湘华[3]，谢车轮[3]，汪志才[2]，唐夏菲[2]

(1. 国网湖南省电力公司经济技术研究院，湖南 长沙 410004；2. 长沙理工大学清洁能源与智能电网湖南省 2011 协同创新中心，湖南 长沙 410004；3. 国网湖南省电力公司，湖南 长沙 410004)

**摘要：**大机组降压运行是一种缓解区域电网输变电容量与负荷发展不平衡现象有效且经济的手段。然而，大机组降压运行在减小原电压层面电网系统短路阻抗的同时会增大拟接入电压层面电网母线的短路电流，使得低压侧短路电流超过断路器遮断容量，严重影响电网的安全运行。提出大机组降压运行短路电流变化分析方法及计算模型，研究短路电流变化与降压机组参数之间的数学关系，并应用于湖南省大机组降压运行方案选择中。仿真与工程应用表明，所提出的短路电流变化分析方法能准确且直观地反映大机组降压中短路电流的变化情况，为电网安全稳定经济运行提供保障。

**关键词：**机组降压；短路电流；电流增长；经济性；安全稳定

## Short-circuit current analysis under the generator voltage-class-reduction scheme in district grids

TAN Yudong[1], CAI Ye[2], XIE Xintao[1], LI Xianghua[3], XIE Chelun[3], WANG Zhicai[2], TANG Xiafei[2]

(1. State Grid Hunan Electric Power Corporation Economic & Technical Research Institute, Changsha 410004, China; 2. Hunan Province 2011 Collaborative Innovation Center of Clean Energy and Smart Grid, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China; 3. State Grid Hunan Electric Power Corporation, Changsha 410004, China)

**Abstract:** Generator voltage-class-reduction scheme is a kind of efficient and economical approach to solve the imbalance between the increasing local-demand and generator capacity. Whereas, the generator voltage-class-reduction scheme will decrease the short-circuit impedance on the original network side (high-voltage side), in the meanwhile, the short-circuit current in the quasi-accessed networks side (low-voltage side) will be increased, making the short-circuit current exceed the interrupting capacity of the circuit breaker in low-voltage side and affecting the safe operation of the power grid seriously. This paper mainly proposes a novel method of calculating the short-circuit current and a mathematical model in the generator voltage-class-reduction scheme to research the relationship between the variation of short-circuit and the parameters of the generator. The method has been applied to select the generator voltage-class-reduction schemes in Hunan power grids. According to the results of the simulation and application, the method of short-circuit current analysis in this paper can accurately and directly reflect the changing of the short-circuit current in generator voltage-class-reduction schemes, which provides a guarantee for the power grid running with safety and stability.

This work is supported by Youth Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 51607011) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5216D114000A).

**Key words:** generator voltage-class-reduction; short-circuit current; current increase; economy; safety and stability

## 0 引言

我国资源分布不均，区域电源装机容量与负荷发展不平衡是我国电源接入电网的基本特点。电厂“上大压小”计划逐步落实，大容量机组逐步替代小容量机组，220 kV 接入电网机组投运比例明显下降，增大了 500 kV 变电、输电容量需求。与此同时，负荷中心地区受站点选址等外部因素的影响，500 kV 电网建设迟缓，500 kV 电网变电、输电能力不足的问题愈加严重。通过将 500 kV 层面发电机组

**基金项目：**国家自然科学基金青年基金项目(51607011)；国网科技项目(5216D114000A)；湖南省教育厅优秀青年项目(17B006)

降压接入 220 kV 电压等级电网，即为机组降压运行，可缓解这种局部电源供应不足的情况，优化电网运行方式[1]。

500 kV 发电机组降压接入 220 kV 电网一般都会不同层度地增大接入 220 kV 电网母线短路电流[2]，如何简单且准确地判断机组降压方案对电网短路电流的影响，是规划人员迫切需要解决的问题。近年来，国内外针对电网短路电流研究的思路主要可以分为以下几类：1) 短路电流计算方法，考虑定结构、动结构或者适合于电网拓扑调整的短路电流计算方法[3-6]，针对实际运行场景，研究 HVDC 及调压器等对短路电流的影响[7-8]；2) 考虑短路电流对电网结构、受电能力等因素的影响，提出电网分区或者网架优化方法[9-13]；3) 三相短路电流的限制方法[14-15]；4) 短路电流仿真分析方法[16-17]，如 PSCAD、电磁分析等，然而，几乎没有相关研究涉及机组降压运行对电网母线短路电流变化的影响。因此，本文提出大机组降压运行短路电流变化分析方法及计算模型，用于实际电网机组降压方案选择。

## 1　机组降压运行必要性与可行性分析

根据《电力系统安全稳定导则》的相关要求[18]，对于一定规模的电厂或发电机组，其接入系统方案应按照“分层分区”的原则[19]，将不同规模的发电厂和负荷接到相适应的电压网络上。随着负荷快速增长及电网结构日益紧密，新增大型机组电源绝大部分接入 500 kV 电网，导致 500 kV 电网短路电流水平迅速提高。我国两个典型的降压运行实例如表 1 所示。

**表 1　我国机组降压运行实例**

Table 1 Cases of generator voltage-class-reduction scheme

| 方案 | 背景 | 降压机组 | 效果 |
|---|---|---|---|
| 浙江北仑电厂机组降压运行方案 | 500 kV 电网容载比偏低、电网运行损耗较大 | 一台 600 MW 机组从 500 kV 改接入 220 kV | 全国首例 500 kV 并网机组成功改接入 220 kV 电网 |
| 河南华豫电厂机组降压运行方案 | 500 kV 层面短路电流水平较高，500 kV 狮河变下网压力巨大 | 华豫 3 号机组改接至 220 kV 电压等级运行 | 提高 500 kV 层面变电容量容载比，解决驻信地区供电能力不足问题 |

表 1 说明在受端网架发展的初期，受端系统中主力电厂优先考虑接入 500 kV 电网，可以对受端电压起到一定的支撑作用，但受端 500 kV 电网主网架发展到一定阶段，特别是 220 kV 电网逐步形成分区结构后，主力电厂应分层分区接入，具体接入哪个电压等级则应该通过技术比较来确定。

迄今为止有关机组降压运行的研究，几乎都是以实际机组降压运行工程为依托，确定此工程中机组降压运行方案后，仿真分析机组降压后对电网的影响。没有总结大机组降压对电网影响的一般性规律，所得成果无法推广至其他机组降压工程，通用性差。随着电源分层分区接入的逐步实施，机组降压后对拟接入电网短路电流的影响是不可忽略的问题。因此，有必要建立机组降压短路电流影响模型，在选择降压方案时，分析不同设备参数及不同场景下机组降压对拟接入电网短路电流的影响。

## 2　机组降压运行短路电流的计算模型

### 2.1　大机组接入方案

一般来说，大机组接入 500 kV 或者更高电压等级时，基本可以分为两种接入方案，以接入 500 kV 电网为例，电网简化示意图如图 1 所示。

1) 直接接入：大机组通过升压变压器或者变电站接入电网；定义 $Z_1$ 为机组次暂态电抗 $x'_d$、升压变阻抗 $x_T$、机组送出线路阻抗值 $x_L$ 之和。

2) 间接接入：大机组通过 500 kV 联络母线经过升压变电站接入电网。定义联络阻抗为 $Z_L$，500 kV 变压器阻抗为 $Z_T$。

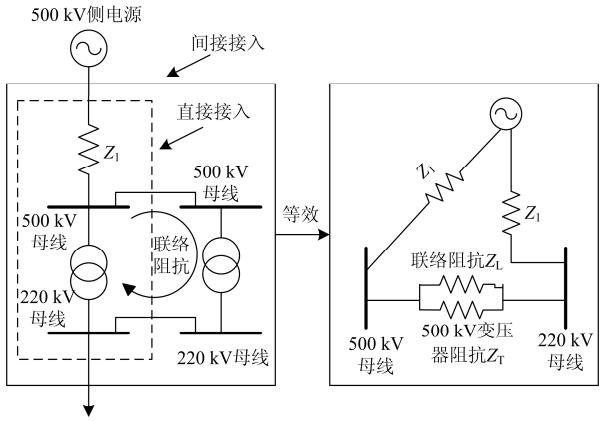


**图 1　大机组接入电网示意图**

Fig. 1 Diagram of generator access schemes

### 2.2　短路电流变化计算模型

基于大机组接入电网方式，建立机组降压对分区电网 220 kV 母线三相短路电流影响的分析模型如图 2 所示。

根据电路叠加原理，机组降压运行后对拟接入电网短路电流变化的影响可以分解为以下三个部分来分析。

1) 机组未降压时，高压侧电网提供给低压侧母线的三相短路电流 $I_i^0$。

2) 机组脱离高压侧电网后，高压侧电网提供给

低压侧母线的三相短路电流 $I_i'$；机组脱离高压侧电网会增大高压侧的短路阻抗从而减小提供给低压侧母线的三相短路电流。

3) 机组接入低压侧母线后，直接增大低压侧短路电流 $\Delta I_{ii}$。

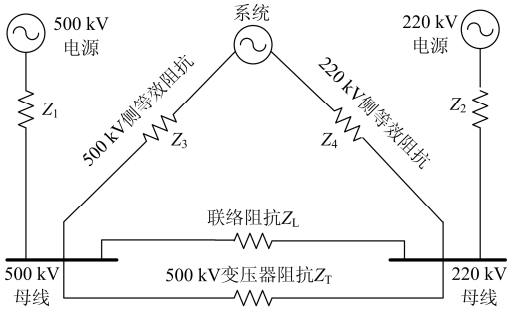


**图 2 大机组降压短路电流变化计算模型示意图**

Fig. 2 Analysis diagram of short-circuit changing under the generator voltage-class-reduction scheme

由此，建立机组降压运行模型后，低压侧短路电流变化统一表达式为

$$\Delta I = \Delta I_{ii} - (I_i^0 - I_i') \tag{1}$$

图 2 中，假设 500 kV 母线电压为 $U$，三相短路电流为 $I_{500}^0$(标幺值)，则 500 kV 系统侧短路阻抗 $Z_{500}$ 满足式(2)。

$$Z_{500} = U / I_{500}^0 \tag{2}$$

式中，$U$ 取 1 p.u.。

机组未降压时，提供给 220 kV 侧母线的短路电流 $I_{220}$ 满足式(3)。

$$I_{220}^0 = 1/(Z_{500} + Z_L // Z_T) \tag{3}$$

### 2.3 大机组脱离高压侧短路电流计算模型

机组脱离 500 kV 侧电网，即断开系统侧拟降压 500 kV 电源的连接线路，相当于在原 500 kV 系统阻抗的基础上并联一条支路，其电抗值为原发电机次暂态电抗 $x_d'$(标幺值)、升压变阻抗 $x_T$(标幺值)、机组送出线路阻抗值 $x_L$(标幺值)之和的相反数。短路电流计算模型示意图如图 3 所示。

500 kV 电源脱离后，右侧 220 kV 母线三相短路电流减小幅度与以下几个因素有关：

1) 500 kV 系统侧阻抗 $Z_{500}$；

2) 联络阻抗 $Z_L$；

3) 500 kV 变压器阻抗 $Z_T$。

这几个参数是相互独立的，不存在相互之间的影响。当一座 500 kV 变电站完全独立供带一个片区 220 kV 网络时(即图 1 中直接接入方式)，则联络阻抗为 0。

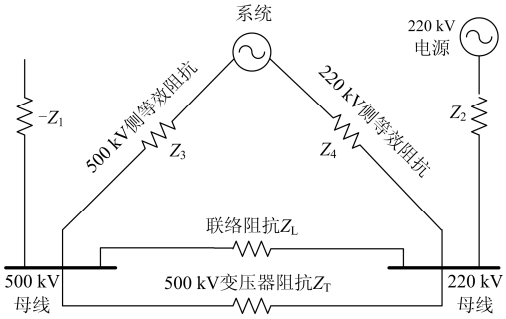


**图 3 大机组脱离电网短路电流计算示意图**

Fig. 3 Analysis diagram of short-circuit changing in the case of generator not access

机组脱离后，500 kV 侧系统等效阻抗 $Z_{500}'$ 如式(4)所示。

$$Z_{500}' = Z_{500} // -Z_1 \tag{4}$$

式中，$Z_1 = x_d' + x_T + x_L$。

500 kV 侧机组脱网同时会造成原 500 kV 系统短路阻抗值增大，从而减小 220 kV 母线的短路电流，提供给 220 kV 母线的短路电流如(5)所示。

$$I_{220}' = 1/(Z_{500}' + Z_L // Z_T) = 1/(Z_{500} // -Z_1 + Z_L // Z_T) \tag{5}$$

拟降压机组脱网后，500 kV 系统提供给 220 kV 母线短路电流变化值如式(6)所示。

$$\Delta I_{220}' = I_{220}^0 - I_{220}' = \frac{1}{Z_{500} + Z_L // Z_T} - \frac{1}{Z_{500} // -Z_1 + Z_L // Z_T} \tag{6}$$

### 2.4 大机组接入低压侧短路电流计算

拟降压 500 kV 机组脱离 500 kV 电网前后，220 kV 系统给 220 kV 母线提供的短路电流不变。拟降压发电机组由 500 kV 改接入 220 kV 后，单独考虑因降压机组接入 220 kV 母线后三相短路电流增加值如式(7)。

$$\Delta I_{220}'' = \frac{1}{X_L' + \dfrac{(X_d' + X_T/1.05)\times 100}{S_G}} \tag{7}$$

式中：$S_G$ 为拟降压机组实际容量；$X_d'$ 为发电机的次暂态电抗；$X_T$ 为升压变压器电抗；$X_L'$ 为机组接入 220 kV 侧机组送出线路阻抗；$X_d'$、$X_T$、$X_L'$ 均为有名值。

## 3 机组降压运行短路电流变化规律

### 3.1 短路电流变化分析模型

根据式(1)、式(6)、式(7)，可以求出机组降压运行对 220 kV 母线短路电流的影响如式(8)所示。

$$\Delta I_{220}=\Delta I''_{220}-\Delta I'_{220}=\frac{1}{X'_{\mathrm{L}}+\dfrac{(X'_{\mathrm{d}}+X_{\mathrm{T}}/1.05)\times 100}{S_{\mathrm{G}}}}-\left(\frac{1}{Z_{500}+Z_{\mathrm{L}}//Z_{\mathrm{T}}}-\frac{1}{Z_{500}//-Z_{\mathrm{l}}+Z_{\mathrm{L}}//Z_{\mathrm{T}}}\right) \tag{8}$$

式中：$x'_{\mathrm{d}}$、$x_{\mathrm{T}}$、$S_{\mathrm{G}}$、$X'_{\mathrm{d}}$、$X_{\mathrm{T}}$、$Z_{\mathrm{L}}$、$Z_{\mathrm{T}}$为已知常数，并满足$Z_{\mathrm{l}}=x'_{\mathrm{d}}+x_{\mathrm{T}}+x_{\mathrm{L}}$；$x_{\mathrm{L}}$、$X'_{\mathrm{L}}$是送出线路长度的函数，即$x_{\mathrm{L}}=f(l)=l\rho_{l*}$，$X'_{\mathrm{L}}=f(l')=l'\rho_{l}$。$l$、$l'$分别为接入 500 kV 等级和 220 kV 等级时机组送出线路长度；$\rho_{l*}$和$\rho_{l}$分别是单位电阻率标幺值和有名值。选取湖南省三个典型 500 kV 发电机组及其升压变压器、接入 500 kV 主变和送出线路的基本参数如表 2 所示。

**表 2 湖南省电源的基本参数**

Table 2 Basic parameters of the generators

| 发电机 | | A | B | C |
|---|---|---|---|---|
| 容量 $S_G$/MWA | | 650 | 650 | 650 |
| 次暂态阻抗 | 有名值 | 0.205 | 0.18 | 0.22 |
| | 标幺值 | 0.030 8 | 0.027 4 | 0.030 2 |
| 线路长度/km | | 26.4 | 62.1 | 11.7 |
| 升压变阻抗 | 有名值 | 14% | 14% | 14% |
| | 标幺值 | 0.019 4 | 0.019 4 | 0.019 4 |
| 500 kV 主变阻抗 | 有名值 | 16% | 12% | 14% |
| | 标幺值 | 0.010 67 | 0.006 85 | 0.018 67 |
| 等效联络阻抗/p.u. | | 0.008 49 | 0.008 49 | 0.008 49 |
| 电厂等效送出线路 | 线型 | LGJ-6×300 | LGJ-6×300 | LGJ-6×300 |
| | 单位阻抗有名值 | 0.000 38 | 0.000 38 | 0.000 38 |
| | 单位阻抗标幺值 | 0.000 07 | 0.000 07 | 0.000 07 |

以发电机组 B 为例，假设机组接入 500 kV 等级和 220 kV 等级时机组送出线路长度相等，即$l=l'$，令：

$$a=Z_{\mathrm{L}}//Z_{\mathrm{T}}=Z_{\mathrm{L}}//0.00685 \tag{9}$$

$$b=f(l)=Z_{l}=\rho_{l}l+x'_{\mathrm{d}}+x_{\mathrm{T}}=0.00007l+0.0468 \tag{10}$$

将式(1)、式(9)、式(10)代入式(6)并化简得到式(11)。

$$\Delta I'_{220}=\frac{1}{\dfrac{1}{I^0_{500}}+a}-\frac{1}{\dfrac{1}{I^0_{500}}//-b+a} \tag{11}$$

将表 2 中数据代入，代入式(7)，得到式(12)。

$$\Delta I''_{220}=\frac{1}{0.00038l'+\dfrac{(0.18+\dfrac{0.14}{1.05})\times 100}{650}}=\frac{650}{0.274l'+31.3}=\frac{650}{0.274l+31.3}=\frac{650}{\left(\dfrac{b-0.0468}{0.00007}\right)\times 0.247+31.3} \tag{12}$$

将式(11)及式(12)代入式(8)，得到大机组降压运行对拟接入供区母线短路电流影响的一般表达式为

$$\Delta I_{220}=\Delta I''_{220}-\Delta I'_{220}=\frac{650}{\left(\dfrac{b-0.0468}{0.00007}\right)\times 0.247+31.3}-\left(\frac{I^0_{500}}{1+aI^0_{500}}+\frac{I^0_{500}b-1}{a(1-b\times I^0_{500})-b}\right) \tag{13}$$

### 3.2 机组脱离电网对短路电流的影响

分析由于机组脱网造成低压侧母线短路电流的变化。假设机组送出线路分别为 5、10、20、30 km 时，得到 220 kV 母线短路电流减小部分随初始状态 500 kV 母线短路电流变化的情况，如图 4 所示。

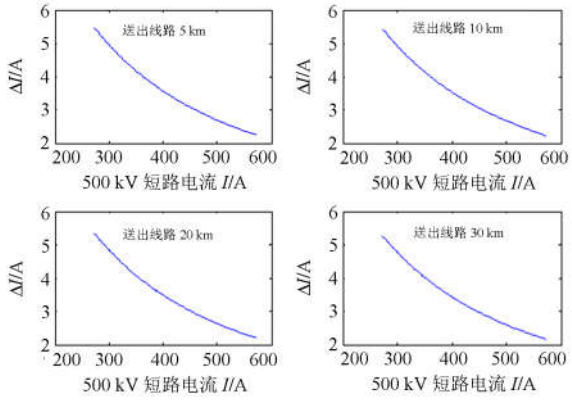


**图 4 220 kV 母线短路电流减小值与 500 kV 母线短路电流之间的关系图**

Fig. 4 220 kV short-circuit declining vs short-circuit of 500 kV bus

由图 4 可以看出：机组脱网后，低压侧母线三相短路电流会减小，但是三相短路电流减小值随机组送出线路长度增长而变化的幅度较小。当机组送出线路长度一定时，初始状态 500 kV 母线三相短路电流越大，机组脱网造成 220 kV 母线三相短路电流减小幅度越小。

当初始状态 500 kV 母线三相短路电流分别为 273、300、350、400 p.u.时，短路电流减小与机组

送出线路长度之间的关系如图 5 所示。由图 5 可知，当初始状态 500 kV 母线三相短路电流一定时，随着线路长度的增加，因系统侧阻抗值变大而使得 220 kV 母线三相短路电流减小值将越来越小。

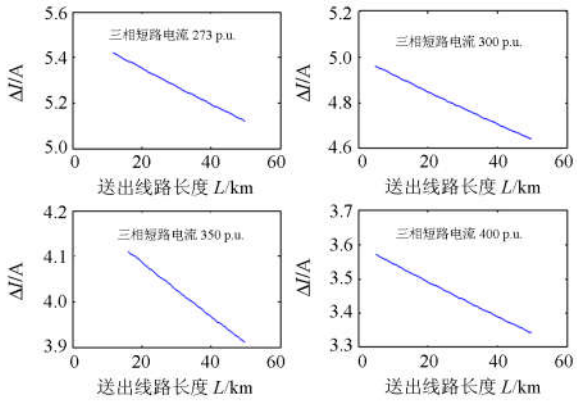


**图 5 220 kV 母线短路电流减小值与机组送出线路长度之间的关系图**

Fig. 5 220 kV short-circuit declining vs line length of the generator access

### 3.3 机组降压运行对短路电流变化的影响

机组由 500 kV 降压接入 220 kV 电网运行后，对 220 kV 侧母线三相短路电流的影响包括两个部分，即由于机组从 500 kV 脱网导致的短路电流减小和机组接入 220 kV 侧导致的短路电流增大。结合式(9)和式(10)，由式(13)得到机组降压运行后 220 kV 侧电网短路电流的变化是机组送出线路长度和初始状态 500 kV 母线短路电流的函数。

分析输电线路长度分别为 5、10、20、30 km 时，220 kV 母线短路电流增加值随初始状态 500 kV 母线三相短路电流变化的情况如图 6 所示。

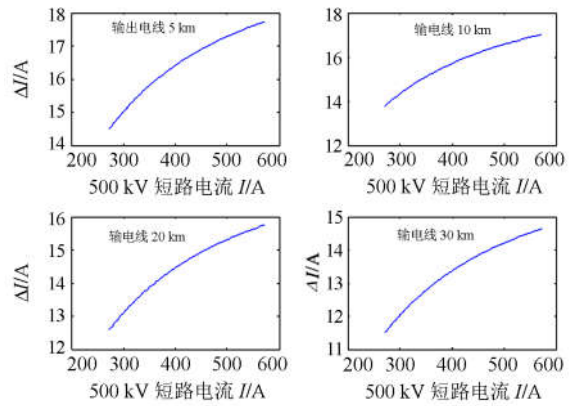


**图 6 220 kV 侧短路电流变化与 500 kV 侧短路电流关系图**

Fig. 6 220 kV short-circuit changing vs short-circuit of 500 kV bus

图 6 结果表明，降压机组送出线路长度变化时，220 kV 母线三相短路电流增大值随 500 kV 母线三相短路电流变化趋势是相同的。

当初始状态 500 kV 母线三相短路电流分别为 273、300、350、400 p.u.时，短路电流变化与机组送出线路长度之间的关系如图 7 所示。

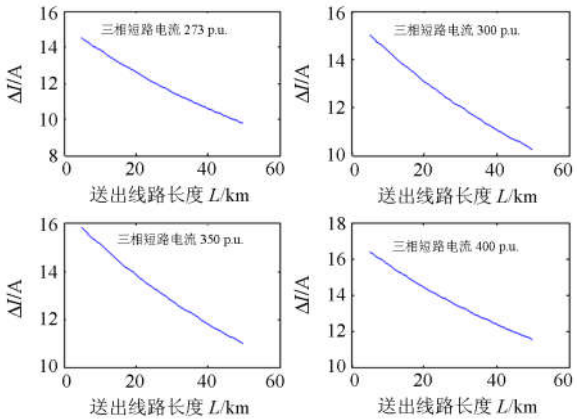


**图 7 220 kV 侧短路电流变化与机组送出线路长度关系图**

Fig. 7 220 kV short-circuit changing vs line length of the generator access

由图 7 可知，随着机组送出线路的变长，220 kV 母线三相短路电流增加值将越来越小，但变化幅度不大。这是因为机组次暂态电抗和升压变电抗要比送出线路的电抗值大得多。

## 4 实例应用

“十二五”期间，湖南电网接入 500 kV，220 kV、110 kV 层面的电源装机增长速度分别为 6.06%、4.10%、7.01%，接入 220 kV 电网的电源装机增长速度明显低于接入 110 kV 和 500 kV 层面电网电源装机的增长速度。局部地区由于接入不同电压等级的电源分布不均，500 kV 变电站降压容量有限，导致机组发出的电能不能有效地就地消纳。因此，需将 500 kV 电压等级接入的电源降压接入 220 kV 电网，缓解 500 kV 变压容量不足的局面，同时调节电网各电压等级接入电源的比例。基于湖南省电网 BPA 仿真得到三个拟降压机组降压运行前后 220 kV 侧母线三相短路电流大小，并与本文提出的三相短路电流变化计算模型结果进行对比，短路电流变化结果如表 3 所示。

表 3 说明本文提出的大机组降压对电网短路电流影响的计算模型，能较准确且快速地反映出机组降压后对分区低压侧电网短路电流控制节点三相短路电流增大作用。机组升压变和送出线路取常规参数下，600 MW 级发电机组降压接入 220 kV 电网，

拟接入区域电网 220 kV 母线三相短路电流增加幅度为 2~5 kA。

**表 3 短路电流变化对比表**

Table 3 Comparison of the short-circuit changing

| | BPA 计算结果 | | 模型计算结果 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 未降压时三相短路电流/kA | 降压后三相短路电流/kA | 短路电流变化值/kA | 短路电流变化值/kA | 误差 |
| A 机组 | 43.257 | 6.332 | 3.075 | 3.035 | 0.04 |
| B 机组 | 33.112 | 36.852 | 3.74 | 3.52 | 0.22 |
| C 机组 | 33.857 | 37.984 | 4.127 | 3.92 | 0.207 |

## 5　结论

本文建立了机组降压对拟接入分区 220 kV 电网短路电流影响的计算模型，机组降压运行对 220 kV 侧母线三相短路电流的增大作用可简化地看成以下两部分的叠加：1) 拟降压机组接入后直接注入 220 kV 侧母线的三相短路电流 $\Delta I_{ii}$；2) 拟降压机组从 500 kV 侧母线脱离后引起 220 kV 侧母线三相短路电流的减小作用 $(I_i^0 - I_i')$。

仿真结果表明，220 kV 侧电网短路电流增加幅度与机组送出线路长度、初始状态 500 kV 侧母线三相短路电流等因素有关。一般地，600 MW 级发电机组降压接入 220 kV 电网，拟接入区域电网 220 kV 母线三相短路电流增加幅度为 2~5 kA。计算结果与实际值对比表明，本文提出的方法能够较准确且快速地反映机组降压运行对电网短路电流变化的影响。

## 参考文献


[1] 罗纯坚, 潘力强, 费烨, 等. 电厂机组降压运行后消纳能力分析[J]. 湖南电力, 2014, 34(2): 36-37, 46.
LUO Chunjian, PAN Liqiang, FEI Ye, et al. Analysis on assimilative capacity of power plant unit in operation with lower voltage level[J]. Hunan Electric Power, 2014, 34(2): 36-37, 46.

[2] 程军照, 陈江波, 张曦, 等. 特高压 1000 kV 降压 220 kV 变压器的应用前景分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 142-148.
CHENG Junzhao, CHEN Jiangbo, ZHANG Xi, et al. Application prospect analysis for 1000 kV/220 kV UHV transformer[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 142-148.

[3] 朱峥, 李帅虎, 李一泉, 等. 在线短路电流计算精确等效模型研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(1): 42-46.
ZHU Zheng, LI Shuaihu, LI Yiquan, et al. A study on accurate equivalent model of short circuit current calculation[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(1): 42-46.

[4] 陶建鑫, 朱本坤. 基于环网的短路电流计算方法研究[J]. 电子设计工程, 2013, 21(3): 163-165.
TAO Jianxin, ZHU Benkun. Research of short circuit current calculating method based on annular grid[J]. Electronic Design Engineering, 2013, 21(3): 163-165.

[5] 尹俊, 毕天姝, 刘素梅, 等. 一种改进的双馈风电机组短路电流精确计算方法[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2015, 42(5): 1-7.
YIN Jun, BI Tianshu, LIU Sumei, et al. An improved accurate calculation method for short-circuit current in doubly-fed wind turbines[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2015, 42(5): 1-7.

[6] 曹炜, 闫宇星, 戈晴天, 等. 考虑动态负荷改进 PSS/E BKDY 模块的短路电流衰减计算[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 135-141.
CAO Wei, YAN Yuxing, GE Qingtian, et al. Improvement of PSS/E BKDY module for short-circuit current decay calculation with dynamic load[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 135-141.

[7] 陈志光, 范幸, 李一泉, 等. 基于稀疏矩阵变换的电网故障电流快速算法[J]. 广东电力, 2015, 28(9): 50-55.
CHEN Zhiguang, FAN Xing, LI Yiquan, et al. Fast algorithm for power grid faulted current based on sparse matrix transform[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(9): 50-55.

[8] 但扬清, 刘文颖, 朱艳伟, 等. 基于补偿法的快速短路电流算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 103-106.
DAN Yangqing, LIU Wenying, ZHU Yanwei, et al. A fast algorithm of short-circuit current based on compensation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 103-106.

[9] 冯树海, 於益军, 王礼文, 等. 适用于拓扑调整的短路电流快速计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 28-33.
FENG Shuhai, YU Yijun, WANG Liwen, et al. A method of fast short-circuit current calculation for topology adjustment[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 28-33.

[10] 罗庆跃, 李晓明. 变结构电网短路电流计算方法[J]. 电力建设, 2004, 25(6): 21-23.
LUO Qingyue, LI Xiaoming. Structure transform calculation of power network short-circuit current[J]. Electric Power Construction, 2004, 25(6): 21-23.

[11] 王春雷, 张文青, 陆献传, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 的短路电流计算标准分析[J]. 电网与清洁能源, 2011,

27(3): 15-18.
WANG Chunlei, ZHANG Wenqing, LU Xianchuan, et al. Short-circuit current calculation standards based on PSCAD/ EMTDC[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(3): 15-18.

[12] 杨冬, 刘玉田, 牛新生. 电网结构对短路电流水平及受电能力的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 62-67.
YANG Dong, LIU Yutian, NIU Xinsheng. Analysis on influence of power grid structure upon short circuit level and power receiving capability[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22): 62-67.

[13] 盛万兴, 马静, 张瑜, 等. 基于故障等值网络的双馈风电机组三相短路电流计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 7-14.
SHENG Wanxing, MA Jing, ZHANG Yu, et al. Research on calculation method of three-phase short circuit current for doubly-fed wind power generator based on the fault equivalent network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 7-14.

[14] 韩戈, 韩柳, 吴琳. 各种限制电网短路电流措施的应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 141-144, 151.
HAN Ge, HAN Liu, WU Lin. Application and development of methods on limiting power grid's short-circuit current[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 141-144, 151.

[15] 艾琳, 冯艳虹, 陈为化, 等. 特高压接入京津冀北 500 kV 电网短路电流问题及限流措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 133-137.
AI Lin, FENG Yanhong, CHEN Weihua, et al. Research on short-circuit current problem and limiting measures caused by UHV substation connecting to 500 kV network in Beijing-Tianjin Area and Northern Hebei[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 133-137.

[16] 丁茂生, 王辉, 舒兵成, 等. 含风电场的多直流送出电网电磁暂态仿真建模[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 63-70.
DING Maosheng, WANG Hui, SHU Bingcheng, et al. Electromagnetic transient simulation model of multi-send HVDC system with wind plants[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 63-70.

[17] BISWAL M, BISWAL S. A positive-sequence current based directional relaying approach for CCVT subsidence transient condition[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 81-91. DOI: 10.1186/s41601-017-0038-0.

[18] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 电力系统安全稳定导则: DL/T755—2001[S].

[19] 钟清, 朱然, 任震. 基于分层分区原则的大机组接入系统的电网规划[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2005, 33(12): 104-108.
ZHONG Qing, ZHU Ran, REN Zhen. Power network planning of large-scale units accessed to power systems based on layers and zone[J]. Journal of South China University Technology (Natural Science Edition), 2005, 33(12): 104-108.

**收稿日期：2017-09-26；　　修回日期：2017-11-14**

**作者简介：**

谭玉东(1983—)，男，博士，高级工程师，主要研究方向为电网规划；E-mail: tanyudong@126.com

蔡　晔(1988—)，女，通信作者，博士，硕士研究生导师，主要研究方向为电网稳定性分析与仿真方法等。E-mail: caiye@csust.edu.cn

(编辑　魏小丽)