

用于解决电网输电阻塞的机组降压运行方案 多阶段优选方法

黄 冰¹, 李 勇¹, 谭 益¹, 谭玉东², 谢欣涛², 侯益灵²

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 国网湖南省电力公司经济技术研究院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 针对电网存在的 500 kV 网络传输容量不足问题, 提出一种机组降压运行方案的多阶段优选方法。首先, 根据机组电压等级和机组容量与负荷的匹配度确定降压机组方案的候选集合; 然后, 选取系统网损、线路潮流过载率、电压偏移率、静态电压稳定裕度、静态灵敏度和短路电流作为机组降压运行方案的评价指标, 并构建线性加权的优化模型, 采用变异系数法计算优化模型的权重, 根据优化结果对待选降压方案进行综合排序; 最后, 对降压运行方案进行 $N-1$ 校核和稳定性计算, 综合分析各个方案对电网的安全稳定性影响, 最终优选出降压运行方案。以某电网为例, 结果表明所提方法能够有效缓解 500 kV 网络输电阻塞问题, 降低网络损耗、优化网络架构。

关键词: 机组降压运行; 电压偏移率; 线路潮流过载率; 线性加权; 变异系数法; $N-1$ 校核

中图分类号: TM 732

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.01.023

0 引言

随着国民经济的快速发展, 受国家宏观政策和发电企业提高运行效益等因素的影响, 电力系统新投运的机组多为 600 MW 及以上机组, 未来 5 至 10 年 1 000 MW 级机组也将大量投运^[1-2]。因此, 220 kV 电网机组投运比例明显下降。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 站点及 220 kV 通道建设不能适应快速增长的负荷, 部分线路出现输电阻塞, 故部分地区电力供应出现不足, 供电可靠性和电压稳定问题日益突出^[3-8]。由 220 kV 网络电源不足导致的输电阻塞与安全稳定问题变得愈加严重。

目前, 《电力系统安全稳定导则》^[9]是选择电厂接入系统方案的主要依据。导则规定, 合理分层, 将不同规模的发电厂接到相适应的电压网络。因此, 合理的电网结构^[8-12]是保证电力系统安全运行的基础, 譬如合理的分层分区可以使得负荷就地平衡, 缓解输电阻塞并提升稳定运行水平^[13-16]。对于 220 kV 网络电源不足导致的输电阻塞问题, 可通过合理地改接部分 500 kV 电源, 使其降压运行, 直接服务于 220 kV 电网, 实现负荷就地消纳, 缓解 500 kV 网络下网压力。

大型机组电压等级的选择不只影响自身的运行经济性, 还对电力系统的安全稳定性产生重大影响。

因此, 机组降压运行方案的选取需要综合考虑方案的经济性、电网安全稳定性等因素。文献[17]研究了将 1 000 MW 机组接入 220 kV 电网的可行性, 以便为 500 kV 电网提供更大发展空间。文献[18-19]中提出: 对于送端电网, 600 MW 及以上机组宜接入 500 kV 电网, 以便于提高送电系统的稳定性; 对于受端电网, 特别是负荷中心, 600 MW 机组可接入地区 220 kV 主网, 以避免变电容量的浪费、提高电网投资效益和发电厂发电效益。

目前有关机组降压运行的文献^[2,17,19]大多是从机组降压运行后系统的潮流分布、电压稳定水平和短路电流来讨论机组降压运行方案的可行性, 没有考虑机组降压运行后系统的静态稳定裕度和经济性等指标, 也没有定量地分析机组降压运行方案的合理性, 因此有必要寻求一种同时考虑方案的经济性、静态电压裕度的机组降压运行优化方法, 用于优选合理的机组降压运行方案。

鉴于此, 本文提出一种电网机组降压运行方案的多阶段优选方法。首先, 根据机组容量与负荷的匹配度、机组接入电网的电压等级确定初始的机组降压运行方案集合; 然后, 基于网损、电压偏移率、线路潮流过载率、静态电压稳定裕度、静态灵敏度和短路电流指标, 采用线性加权的方法建立评价机组降压方案的目标函数, 运用变异系数法确定目标函数的权重, 对目标函数进行排序, 从而选择优化方案; 最后, 通过 $N-1$ 和暂态电压校验确定最终的机组降压运行方案。本文将通过实际算例验证所提出的多阶段优选方法的有效性。

收稿日期: 2016-01-07; 修回日期: 2016-08-29

基金项目: 国家电网公司科技项目(5216A213509X)

Project supported by the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China(5216A213509X)

1 机组降压方案优选的总体策略

本文提出的机组降压运行方案的多阶段优选方法的流程如图 1 所示,具体如下。

(1)第一阶段:根据发电厂装机容量与负荷的匹配度和各个发电厂机组接入的电压等级来确定机组降压运行方案的候选集合。

(2)第二阶段:首先,对各个候选方案进行网损、线路潮流过载率、电压偏移率、静态电压稳定裕度、静态灵敏度及短路电流的计算;然后,建立一个线性加权的评价模型,并用变异系数法确定评价模型中的权重,根据目标函数的大小,对初选方案进行排序。

(3)第三阶段:对优化方案进行 $N-1$ 和暂态电压稳定性校验,优选出满足综合评价指标的机组降压运行方案。

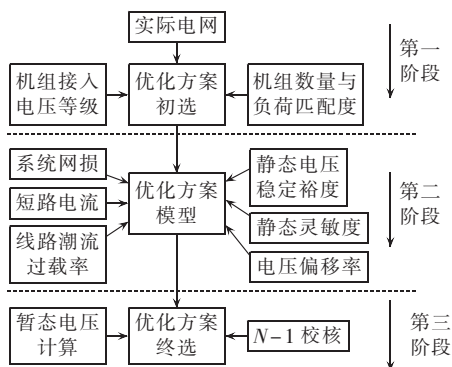


图 1 机组降压优选策略流程图

Fig.1 Flowchart of optimal scheme selection for voltage-reduced unit operation

2 机组降压运行方案多阶段优选方法

2.1 第一阶段:降压运行方案初筛

本文主要是通过发电机组电压等级和电源负荷的匹配度来确定机组降压运行方案的候选集合。电源负荷匹配度的计算公式如下:

$$\beta = \frac{G_{\max}}{P_D} \quad (1)$$

其中, β 为电源负荷匹配度; $G_{\max}$ 为电源最大可用容量; P_D 为分区最大中调负荷。

指标 β 反映出分区供电来源于本地电源的程度。 β 越大,则该地区供电主要依靠本地电源,对 500 kV 电网的依赖越小,风险水平越低,从而使负荷能够更好地就地消纳。

2.2 第二阶段:降压运行方案的综合排序

2.2.1 目标函数

本文综合考虑系统网损、线路潮流过载率、节点电压指标、静态电压稳定裕度、静态灵敏度和短路电流,基于线性加权法建立如式(2)所示的机组降压方案的目标函数。

$$\min F(x) = \omega_1 f_1(x) + \omega_2 f_2(x) + \omega_3 f_3(x) + \omega_4 f_4(x) + \omega_5 f_5(x) + \omega_6 f_6(x) \quad (2)$$

其中, $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $f_3(x)$ 、 $f_4(x)$ 、 $f_5(x)$ 、 $f_6(x)$ 分别表示系统网损、节点电压偏移率、支路潮流过载率、静态电压稳定裕度、静态灵敏度及短路电流; ω_1 、 ω_2 、 ω_3 、 ω_4 、 ω_5 、 ω_6 为依次对应上述 6 种指标的权重。

机组降压运行方案能够带来一个明显的效益是降低网损、提高能源利用率,其中系统网损评价指标定义如下:

$$I_p = \frac{P_{LD}}{P_L} \quad (3)$$

其中, I_p 为系统网损评价指标; P_{LD} 和 P_L 分别为机组降压运行方案后和方案前的网损值。 I_p 能够有效反映机组降压运行后的电网网损变化情况。

合理的机组降压运行方案能够改善电压分布情况,使电压偏移维持在较小范围内。电压偏移率指标,即计算主要节点电压和其额定电压偏差与节点额定电压之比的和,节点电压偏移率指标如下式所示:

$$B = \frac{1}{N_B - 1} \sum_{i=1}^{N_B-1} \frac{|U_i - U|}{U} \quad (4)$$

其中, N_B 为节点总数; U_i 、 U 分别为第 i 个节点的电压值和其对应的额定值。

机组降压运行方案可能减少部分线路的潮流,但也可能会增加部分线路的潮流,因此需要对线路潮流水平进行评价。支路潮流过载率指标定义如下:

$$C = \frac{1}{N_C} \sum_{i=1}^{N_C} S_{ij}^t / S_{ij}^{\max} \quad (5)$$

其中, N_C 为系统线路数; S_{ij}^t 为线路潮流; $S_{ij}^{\max}$ 为线路潮流限值。

本文采用功率储备系数 K_P 和电压储备系数 K_U 来反映系统的静态电压稳定裕度。功率储备系数 K_P 和电压储备系数 K_U 的定义为:

$$K_P = \frac{P_{\max} - P}{P} \quad (6)$$

$$K_U = \frac{U_0 - U_{cr}}{U_0} \quad (7)$$

其中, $P_{\max}$ 为系统极限有功功率; P 为正常运行系统有功功率; U_0 为正常运行电压; U_{cr} 为临界电压。在静态电压稳定分析中,当系统传输功率接近或达到极限值时,系统电压达到临界点,对应的静态电压稳定分析曲线 ($P-U$ 曲线) 达到拐点位置。该点的 U_{cr} 为临界电压, $P_{\max}$ 为系统极限功率。 $P-U$ 曲线通常采用连续潮流法求得^[20-21]。

本文采用 PSD-Vsap 静态电压稳定分析程序来绘制 $P-U$ 曲线,从而计算出节点的功率储备系数 K_P 和电压储备系数 K_U 。 $P_{\max}$ 越大,功率储备系数越大,系统的静态电压稳定裕度越大,系统电压稳定性越强; U_{cr} 越小,电压储备系数 K_U 越大,系统的静态电

压稳定裕度越大,系统电压稳定性越强。

静态灵敏度指标(dU/dQ)用来反映在某一运行状态下,系统内某节点无功补偿的变化(dQ)对其电压幅值产生的影响(dU)。静态灵敏度越大,表示该节点电压支撑能力越薄弱。

短路电流指标指主要母线短路电流与母线遮断电流之差的和与母线遮断电流之比。该指标的稳态水平属于正向,反映的是在系统当前运行状态的短路电流水平下,母线节点的当前短路电流与断路器最大遮断电流之间的距离。

2.2.2 约束条件

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Di} = |U_i| \sum_{j=1}^{N_b} |U_j| (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{Gi} - Q_{Di} = -|U_i| \sum_{j=1}^{N_b} |U_j| (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \\ P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \end{cases} \quad (8)$$

其中, P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为发电机组的有功出力和无功出力; P_{Di} 、 Q_{Di} 分别为节点的总有功和无功负荷; $|U_j|$ 为节点 j 的电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为连接节点 i 、 j 的电导和电纳; θ_{ij} 为不同节点间电压相角; $U_{\min}$ 、 $U_{\max}$ 分别为第 i 个节点的最小允许电压值和最大允许电压值; $P_{Gi}^{\min}$ 、 $Q_{Gi}^{\min}$ 分别为发电机的最小有功和无功出力; $P_{Gi}^{\max}$ 、 $Q_{Gi}^{\max}$ 分别为发电机的最大有功和无功出力。

2.2.3 指标权重计算

层次分析法^[22-23]用相对标度将人的判断量化,通过求解判断矩阵得出各项指标的权重。然而,当不确定性和模糊性等因素较多时,层次分析法易受到打分者主观判断的影响,因此基于该方法计算的权重具有一定的主观性。相反,变异系数法是一种利用被评价对象指标的变异程度确定指标权重的方法,可实现被评价对象各指标的动态赋权^[24],它是一种客观计算权重的方法。因此,本文采用变异系数法计算评价指标的权重。首先利用各机组降压运行方案的指标确定评价矩阵,进而通过对指标矩阵的计算获得指标的权重向量,主要计算步骤如下。

(1)建立评价矩阵。

各机组降压方案评价指标数量相同且均有 6 个,第 j 个机组降压方案的评价指标向量为 $\mathbf{Y}_j = [y_{1j}, y_{2j}, y_{3j}, y_{4j}, y_{5j}, y_{6j}]^T$,其中, y_{1j} 为机组降压运行方案的系统网损值; y_{2j} 为节点电压偏移率指标; y_{3j} 为支路潮流过载率指标; y_{4j} 为静态稳定裕度指标; y_{5j} 为静态灵敏度指标; y_{6j} 为短路电流指标。

如果有 n 个机组降压方案,则评价矩阵可表示为 $\mathbf{Y} = [\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2, \dots, \mathbf{Y}_n]$ 。机组降压方案评价指标的权重用 ω 表示,则权重向量为 $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m]^T$ ($m=6$ 为评价指标的数量)。

(2)指标同向化。

根据前述构造方法可建立评价矩阵 $\mathbf{Y} = (y_{ij})_{m \times n}$,其中, n 为被评价对象的数量。如果 m 个评价指标中有负向指标(即指标值越小、状况越好的指标),则首先进行指标同向化处理,将其转化为正向指标(指标值越大其反映的状况越优)进行统一处理。具体方法如下:

$$y'_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{k + \max |\mathbf{Y}_i| + y_{ij}} & \text{负向指标} \\ y_{ij} & \text{正向指标} \end{cases} \quad (9)$$

其中, y'_{ij} 为正向指标评价矩阵 $\mathbf{Y}'$ 的元素; $\max |\mathbf{Y}_i|$ 表示指标向量 $\mathbf{Y}_i$ 所在行元素中的最大值; k 一般取 0.1。

对指标进行同向化处理后得到评价矩阵 $\mathbf{Y}'$,再对 $\mathbf{Y}'$ 进行去量纲化处理后得到标准矩阵 $\mathbf{Y}''$ 。指标的去量纲化处理方法如下:

$$y''_{ij} = \frac{y'_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n y'^2_{ij}}} \quad i=1, 2, \dots, m \quad (10)$$

(4)指标权重计算。

针对去量纲化处理后的标准矩阵 $\mathbf{Y}''$,分别采用式(11)、(12)计算指标均值和标准差:

$$\bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y''_{ij} \quad i=1, 2, \dots, m \quad (11)$$

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y''_{ij} - \bar{y}_i)^2} \quad i=1, 2, \dots, m \quad (12)$$

利用指标均值和标准差计算变异系数 V_i ,如式(13)所示。

$$V_i = s_i / |\bar{y}_i| \quad (13)$$

利用变异系数 V_i 可计算各指标的权重 ω_i ,具体如式(14)所示。

$$\omega_i = V_i / \sum_{i=1}^m V_i \quad (14)$$

其中, $m=6$ 。

2.3 第三阶段: $N-1$ 校验和稳定性评估

$N-1$ 原则是判定运行方案安全性的一种准则。一般而言, $N-1$ 原则要求电力系统任一独立元件(发电机、输电线路、变压器等)发生故障被切除后,不造成其他元件过载。如果 $N-1$ 准则不能满足,则需要对运行方案进行调整。

发电机接入电网后,将会对电网的电压稳定性产生一定的影响,其主要的稳定判据为:在电网受到扰动后的暂态过程中,负荷母线电压能恢复到 0.8 p.u. 以上,中长期过程中负荷母线电压能保持或恢复到 0.9 p.u. 以上。

3 算例分析

以图 2 所示的湖南东部电网为例,验证本文提出的多阶段优选方法的有效性。如图 2 所示,考虑的电压等级为 220 kV 和 500 kV,总装机容量为

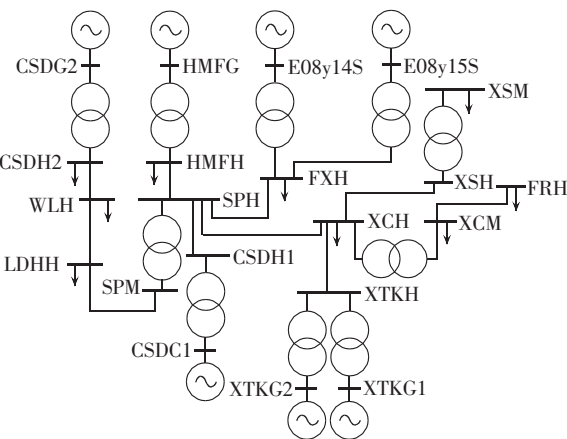


图 2 湖南东部电网系统结构图

Fig.2 Structural diagram of Eastern Hunan Power Grid

4621.7 MW, 负荷总量为 4600 MW。由于 220 kV 网络总装机容量不足, 连接在 500 kV 星沙、星城和沙坪母线处的主变下网压力大, 存在 $N-1$ 输电阻塞问题。解决该问题的方法之一, 是把长沙电厂和湘潭电厂的部分机组降压运行, 缓解 500 kV 主变的下网压力, 使负荷能够就地消纳。

3.1 机组降压运行方案初筛

根据发电厂装机容量与负荷发展的匹配度, 筛选出的机组降压方案如图 3—5 所示, 具体说明如下。

方案 1: 不考虑调整湘潭电厂送出方案, 将长沙电厂—长沙电单回 500 kV 线路改接到星沙 220 kV

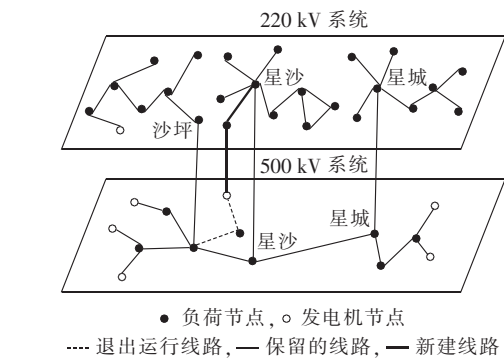


图 3 机组降压方案 1

Fig.3 Unit voltage reduction scheme 1

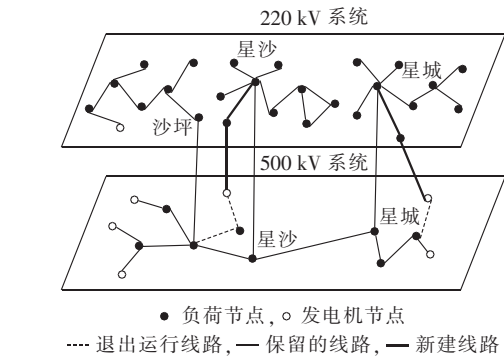


图 4 机组降压方案 2

Fig.4 Unit voltage reduction scheme 2

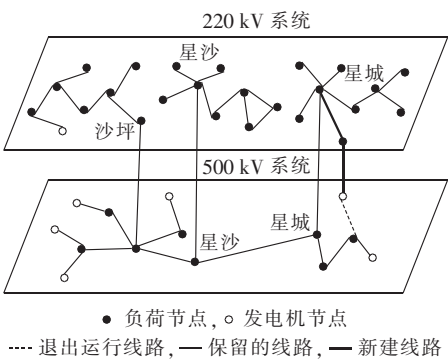


图 5 机组降压方案 3

Fig.5 Unit voltage reduction scheme 3

母线, 新建长沙电厂—星沙 220 kV 线路, 同时长沙电厂—长沙电原有 500 kV 线路退出运行。

方案 2: 将湘潭电厂—湘潭扩单回 500 kV 线路改接到星城 220 kV 母线, 长沙电厂—长沙电单回 500 kV 线路改接到星沙 220 kV 母线, 新建湘潭电厂—星城 220 kV 线路、长沙电厂—星沙 220 kV 线路, 同时将湘潭电厂—湘潭扩、长沙电厂—长沙电原有的 500 kV 线路退出运行。

方案 3: 不考虑调整长沙电厂送出方案, 将湘潭电厂—湘潭扩单回 500 kV 线路改接到星城 220 kV 母线节点, 新建湘潭电厂—星城 220 kV 线路, 同时将湘潭电厂—湘潭扩原有的 500 kV 线路退出运行。

3.2 机组降压运行方案综合排序

初选的机组运行方案的评价指标计算结果如表 1 所示。采用第 2.2 节提出的综合评价方法, 利用表 1 中的指标数据对各机组降压运行方案进行综合评价。

表 1 机组降压运行方案指标数据
Table 1 Indexes of unit voltage reduction scheme

指标	原方案	方案 1	方案 2	方案 3
系统网损	1.0000	0.9532	0.9189	0.9647
节点电压偏移率	0.02235	0.02205	0.01875	0.02635
支路潮流过载率	0.354845	0.352805	0.353545	0.35780
静态电压稳定裕度	0.7413	0.7933	0.8395	0.7852
静态灵敏度	0.3071	0.3009	0.2952	0.3824
短路电流	0.5897	0.6636	0.5546	0.4296

根据前述变异系数法生成评价矩阵, 并对评价矩阵进行同向化处理, 将系统网损、节点电压偏移率、支路潮流过载率、电压稳定裕度等指标转化为正向指标, 然后对矩阵进行去量纲化处理, 则可得到如下标准矩阵 Y'' :

$$Y''= \begin{bmatrix} 0.49020 & 0.50133 & 0.50983 & 0.49854 \\ 0.49997 & 0.50098 & 0.51185 & 0.48688 \\ 0.49995 & 0.50119 & 0.50073 & 0.49812 \\ 0.46882 & 0.50171 & 0.53093 & 0.49659 \\ 0.50788 & 0.51191 & 0.51566 & 0.46270 \\ 0.44102 & 0.47682 & 0.51282 & 0.56140 \end{bmatrix} \quad (15)$$

根据式(11)—(14), 可得到指标均值 $\bar{y}_i''$ 和标准

差 s_i , 进而得到变异系数 V_i 、指标权重 ω_i , 结果如表 2 所示。

表 2 指标参数计算结果
Table 2 Results of index parameter calculation

指标	$\bar{y}_i''$	s_i	V_i	ω_i
系统网损	0.499975	0.0081	0.0162	0.09
节点电压偏移率	0.49985	0.0102	0.0204	0.1139
支路潮流过载率	0.49999	0.0094	0.0188	0.1049
静态电压稳定裕度	0.49951	0.0254	0.0508	0.2836
静态灵敏度	0.49953	0.0248	0.0496	0.2769
短路电流	0.49802	0.0116	0.0233	0.1301

从计算结果看, 静态电压稳定裕度、静态灵敏度、短路电流和节点电压偏移率指标的权重较大。因此, 根据式(1)可得到如下的机组降压运行方案优选的目标函数:

$$F=0.09f_1(x)+0.1139f_2(x)+0.1049f_3(x)+0.2836f_4(x)+0.2769f_5(x)+0.1301f_6(x) \quad (16)$$

可得 $F_0=0.484475, F_1=0.500820, F_2=0.517691, F_3=0.494569$, 易知 $F_2>F_1>F_3>F_0$ 。由此可知, 方案 2 优于其他方案。图 6—8 给出了各方案的 $P-U$ 曲线、 $Q-U$ 曲线、母线无功-电压灵敏度柱状图。由图 6 和图 7(图中电压均为标么值, 后同)可知, 3 种机组降压方案的有功和无功裕度相较于降压前均有所增加, 其中方案 2 的有功和无功裕度最大。由图 8 可知, 方案 2 的母线无功-电压灵敏度整体上都比较小, 从而说明方案 2 的节点电压比其他方案的稳定, 这进一步表明方案 2 的综合性能优于其他方案。

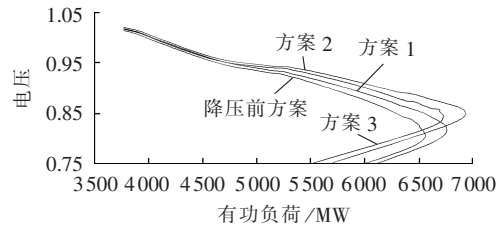


图 6 关键节点星沙 M1 的 $P-U$ 曲线
Fig.6 $P-U$ curves of key node Xingsha M1

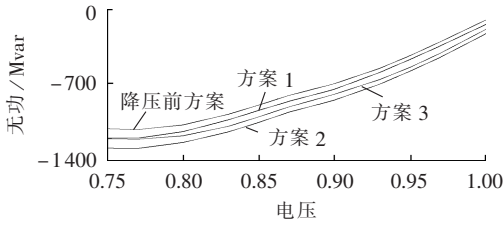


图 7 关键节点星沙 M1 的 $Q-U$ 曲线
Fig.7 $Q-U$ curves of key node Xingsha M1

3.3 N-1 校验和稳定性校验

采用 PSD-BPA 软件对各个方案进行 $N-1$ 校验, 结果表明上述 3 种方案均满足 $N-1$ 安全条件, 没有过载支路。进一步, 采用暂态仿真的方法, 在 500 kV 电压等级母线星沙 H—星城 H 发生三相接

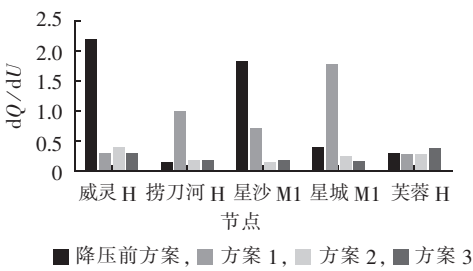


图 8 关键节点的无功-电压灵敏度
Fig.8 Sensitivity of reactive power to voltage for key nodes

地短路故障时, 所得关键母线电压曲线如图 9 所示。从图 9 可以看出, 各方案在发生故障, 相关线路故障消除后, 电压都能趋于稳定。由此可见, 3 种可选降压方案都不会影响系统的稳定性。因此, 综合考虑经济性和安全性, 最终优选出方案 2 为机组降压运行的优化方案。

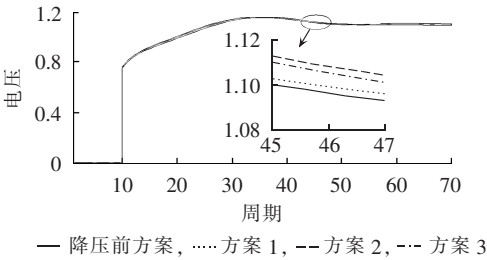


图 9 关键节点星沙 H 母线的电压稳定曲线
Fig.9 Bus voltage stability curve of key node Xingsha H

4 结论

本文提出了一种用于解决电网输电阻塞的机组降压运行方案多阶段优选方法。该方法基于变异系数法综合确定多指标权重, 建立计及系统网损、线路潮流过载率、电压偏移率、静态电压稳定裕度、静态灵敏度和短路电流的指标矩阵, 通过计算指标向量的均值及标准差得到反映不同指标重要程度的权重, 结果更具客观性。实际算例表明, 本文提出的基于变异系数法的线性加权综合优化模型, 能够对机组降压运行方案进行客观的整体评价, 进而优选出兼顾经济性与安全性的机组降压运行方案。通过本文方法优选出的机组降压运行可以有效缓解区域供电压力, 充分发挥系统潜在的供电能力, 并且对合理安排发电机组的降压运行方案具有重要的指导意义。

参考文献:

[1] 王海潜,王旭,祁万春,等. 1000 MW 发电机组接入 220 kV 电网相关问题研究[J]. 华东电力, 2014, 42(7): 1305-1309.
WANG Haiqian, WANG Xu, QI Wanchun, et al. Integration of 1000 MW coal-fired generation unit to 220 kV grid[J]. East China Electric Power, 2014, 42(7): 1305-1309.
[2] 罗纯坚,潘立强,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.
- 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.
- [3] 吴涵,陈彬,管霖,等. 供电可靠性提升措施优选的量化评价方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(5):126-130.
- WU Han,CHEN Bin,GUAN Lin,et al. Quantitative evaluation and optimized selection of power supply reliability enhancement measures[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(5):126-130.
- [4] 任杰帧,鞠平,赵娟,等. 考虑电动机负荷的静态电压稳定分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(5):139-143.
- REN Jiezheng,JU Ping,ZHAO Juan,et al. Static voltage stability analysis considering motor loads[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(5):139-143.
- [5] 文学鸿,袁越,鞠平. 静态电压稳定负荷裕度分析方法比较[J]. 电力自动化设备,2008,28(5):59-62.
- WEN Xuehong,YUAN Yue,JU Ping. Comparison between CPF and PDIP for voltage stability margin evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(5):59-62.
- [6] GAO B,MORISON G K,KUNDUR P. Voltage stability evaluation using modal analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1992,7(4):1529-1542.
- [7] MANSOUR Y,XU W,ALVARADO F,et al. SVC placement using critical modes of voltage instability[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1994,9(2):757-763.
- [8] 邱妍,赵晋泉,朱永忠. 负荷随机扰动对电力系统电压稳定性的影响[J]. 电力自动化设备,2009,29(2):77-81.
- QIU Yan,ZHAO Jinquan,ZHU Yongzhong. Effect of stochastic load disturbance on power system voltage stability based on bifurcation theory[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(2):77-81.
- [9] 赵遵廉,舒印彪,雷晓蒙,等. 电力系统安全稳定导则:DL/T 755—2001[S]. 北京:中国电力科学研究院,2001.
- [10] 沈根才. 正确规划电网结构重视电网稳定性[J]. 电力系统自动化,2001,25(9):38-41.
- SHEN Gencai. Power system planning with emphasis on stability[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(9):38-41.
- [11] 刘健,杨文字,余健明,等. 一种基于改进最小生成树算法并考虑负荷不确定性的配电网架优化规划[J]. 电网技术,2005,29(16):61-65.
- LIU Jian,YANG Wenyu,YU Jianming,et al. An improved minimum-cost spanning tree based optimal planning of distribution networks[J]. Power System Technology,2005,29(16):61-65.
- [12] 王东平,汪旭,杨兵,等. 电网结构规划的启发式方法[J]. 电工技术,2002(1):5-6.
- WANG Dongping,WANG Xu,YANG Bing,et al. The heuristic method of grid structure planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2002(1):5-6.
- [13] 朱旭凯,刘文颖,杨以涵. 综合考虑可靠性因素的电网规划新方法[J]. 电网技术,2004,28(21):51-54.
- ZHU Xukai,LIU Wenyong,YANG Yihan. A new power network planning method by comprehensively considering system reliability factors[J]. Power System Technology,2004,28(21):51-54.
- [14] 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.
- [15] 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 Xinsong. 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.
- [16] 陆圣芝,胡伟,罗建裕. 江苏电网分层分区研究[J]. 江苏电机工程,2006,25(3):11-13.
- LU Shengzhi,HU Wei,LUO Jianyu. Research on voltage grading and network partition of Jiangsu grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2006,25(3):11-13.
- [17] 郭明星,杨增辉,曹娜,等. 1000 MW 机组接入 220 kV 分区电网初探[J]. 华东电力,2010,38(11):1744-1749.
- GUO Mingxing,YANG Zenghui,CAO Na,et al. Research on interconnecting 1000 MW generation unit to 220 kV district grids[J]. East China Electric Power,2010,38(11):1744-1749.
- [18] 高涛,王正风,施杰. 电网运行面临的几个关键问题研究[J]. 东北电力技术,2011(10):1-5.
- GAO Tao,WANG Zhengfeng,SHI Jie. Study on several key problems concerning electric power system operation[J]. Northeast Electric Power Technology,2011(10):1-5.
- [19] 陈尚发. 600 MW 级机组接入 220 kV 分区电网的电气主接线方式探讨[J]. 浙江电力,2012(8):42-44.
- CHEN Shangfa. Discussion on modes of main electric connection for 600 MW units[J]. Zhejiang Electric Power,2012(8):42-44.
- [20] 赵晋泉,张伯明. 连续潮流及其在电力系统静态稳定分析中的应用[J]. 电力系统自动化,2005,29(11):91-97.
- ZHAO Jinquan,ZHANG Boming. Summarization of continuation power flow and its applications in static stability analysis of power system[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(11):91-97.
- [21] 王成山,魏炜. 一种改进的步长控制连续性潮流计算方法[J]. 电工技术学报,2004,19(2):58-63.
- WANG Chengshan,WEI Wei. An improved continuation method with controlled step size[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2004,19(2):58-63.
- [22] 黄文杰,傅砾,肖盛. 采用改进模糊层次分析法的风速预测模型[J]. 电网技术,2010,34(7):164-167.
- HUANG Wenjie,FU Li,XIAO Sheng. A predictive model of wind speed based on improved fuzzy analytical hierarchy process[J]. Power System Technology,2010,34(7):164-167.
- [23] 谢传胜,董达鹏,段凯彦,等. 基于层次分析法-距离协调度的低碳电源电网规划协调度评价[J]. 电网技术,2012,36(11):1-4.
- XIE Chuansheng,DONG Dapeng,DUAN Kaiyan,et al. Coordination degree evaluation of low carbon generation expansion and grid planning based on analytic hierarchy process method and distance coordination degree[J]. Power System Technology

logy, 2012, 36(11): 1-4.

[24] 周建国, 牛东晓, 问歆朴, 等. 电力上市公司综合实力的熵评价[J]. 华北电力大学学报, 2004, 31(3): 71-73.

ZHOU Jianguo, NIU Dongxiao, WEN Xinpu, et al. Comprehensive entropy evaluation of listed electric power company[J]. Journal of North China Electric Power University, 2004, 31(3): 71-73.

作者简介:

黄 冰(1989—), 女, 湖北孝感人, 硕士研究生, 主要从事电力系统运行优化方面的研究 (E-mail: huangbingbirthday@126.com);

李 勇(1982—), 男, 河南信阳人, 教授, 博士研究生导师,



黄 冰

博士, 主要研究方向为电力系统优化与控制、电能质量分析与控制 (E-mail: yongli@hnu.edu.cn);

谭 益(1987—), 男, 湖南株洲人, 博士, 主要从事电力系统运行优化方面的研究 (E-mail: yibirthday@126.com);

谭玉东(1983—), 男, 湖南长沙人, 工程师, 博士, 主要从事电力系统分析与控制方面的研究 (E-mail: yudongtan@126.com);

谢欣涛(1973—), 男, 湖南长沙人, 高级工程师, 主要从事电力系统优化规划方面的研究;

侯益灵(1975—), 男, 湖南长沙人, 高级工程师, 主要从事电力系统优化规划方面的研究。

Multi-stage optimization of voltage-reduced unit operation against transmission congestion

HUANG Bing¹, LI Yong¹, TAN Yi¹, TAN Yudong², XIE Xintao², HOU Yiling²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. State Grid Hunan Economy & Technology Research Institute, Changsha 410004, China)

Abstract: Aiming at the insufficient transmission capacity of 500 kV power grid, a method of multi-stage optimization is proposed for the voltage-reduced unit operation. The candidate sets are determined according to the voltage level of units and the matching degree between unit and load. The network loss, line overload rate, voltage deviation rate, static voltage margin, static sensitivity and short circuit current are selected as the evaluation indexes and a linearly-weighted optimization model is built. The variation coefficient method is adopted to calculate the weights of the model and the candidate voltage reduction schemes are comprehensively ranked according to the optimization results. $N-1$ verification and stability calculation are carried out for the schemes of voltage-reduced operation, the influence on the safety and stability of power grid is analyzed for each scheme, and the optimal one is finally chosen. With a power grid as an example, results show that, the proposed method can effectively alleviate the transmission congestion of 500 kV power grid, reduce the network loss and optimize the network structure.

Key words: voltage-reduced unit operation; voltage deviation rate; transmission line overload rate; linear weighting; variation coefficient method; $N-1$ verification