

计及电网拓扑优化的电压支撑决策模型

孙东磊, 韩学山, 张 波

(山东大学 电网智能化调度与控制教育部重点实验室, 山东 济南 250061)

摘要: 电网电压支撑是源(发电与负荷)网协调合作的结果。电力系统中输配交融, 电能双向流动, 源网间呈现交织纠结的矛盾, 导致仅依赖于源的调整的电压支撑方式出现非同调现象。在源平衡方式给定的前提下, 将电网结构状态调整纳入决策量, 建立考虑变压器过负荷闭锁调档限制的电压支撑决策模型, 并由遗传算法和非线性原对偶内点法组合求解。算例分析证明了所提方法的有效性, 显现应对未来电力系统多变情形下实施源网协同的必要性。

关键词: 电力系统; 电压支撑; 非同调; 电网拓扑; 优化; 智能电网; 源网协同

中图分类号: TM 76

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.11.021

0 引言

发电与用电在时空上产生差异, 同时又考虑资源互补、安全可靠的前提下, 诞生了互联电网, 并伴随着出现了功率传输的电压支撑问题。之所以称其为电压支撑是因为电力系统承载着一个发电侧驱动功率和用电侧制动功率的平衡, 该平衡的能力和裕度与电压水平有关。

电压是衡量电网运行质量的重要指标之一, 其质量及分布与主动电压支撑源(同步发电机组)的励磁调节能力、电网的有功模式以及输配电网设备感性、容性的分布有关。作为被支撑的对象, 有功功率的分布影响着电网设备感性、容性特征, 进而影响电压分布。电网设备感性、容性特征在电网运行中通常以感性或容性无功的形式来表示, 因此, 电压质量主要取决于电网无功潮流分布是否合理。传统电网输电和配电逻辑清晰, 环状输电网中主要是以优化电网无功潮流分布的无功优化为主, 辐射状的配电网中则注重逻辑解析程度很高的中枢点电压管理和配网重构。基于输配电逻辑清晰的传统概念的以无功优化为核心的全网统一的分级分层协调的自动电压控制技术如今在理论研究和实践上已相对成熟^[1-6]。

新形势下, 随着传统的化石能源发电日趋削减, 风光等分布式资源发电逐渐地、且有迅猛发展趋势地并入电网, 以及电力市场竞争机制的不断推进, 使电网架构悄然、渐进地改变, 电力系统呈现出新的特点: 并入电网的电源存在时空分布上的不均衡性, 主要体现在地域分布上的不均衡性、电源容量大小及容

量利用因子的不均衡性; 源网流向存在时空分布上的不清晰性, 输配电固有格局将被逐步打破, 输电和配电难以清晰分离。以上均使现有电网电压调控手段和电压支撑优化决策理论框架面临挑战, 具有适应形势发展不断更新完善的迫切需求。在此背景下, 如何深入研究电网电压支撑规律, 充分挖掘电压支撑中潜在的主动因素以实现高效率的电压调控是目前亟待解决的问题。

为保证电网可靠运行, 电网拓扑架构及其传输容量均处于冗余状态, 但实际上并不是冗余度越高, 系统运行越可靠, 具体要以实际运行情况而定, 这就是电力系统可靠性问题的非同调现象^[7], 即一个元件从系统中缺省反而产生一个更可靠的系统状态。电网结构对电压支撑起着重要作用。传统的短期运行调度中, 电网拓扑结构通常是不变的, 并不参与电网调控, 其原因在于保护配置整定技术和自动化水平难以达到实时拓扑控制的要求。随着继电保护技术和通信自动化水平的提高, 现代电网基本具备了正常运行状态下实时拓扑控制甚至是主动解列运行的条件。因此, 在兼顾电网安全性和可靠性的前提下, 允许输配电元件运行状态切换无疑会丰富电网的可控手段, 不失为一种改善电压支撑水平的有效方法。目前国内外学者已对事故情况下通过改变网络拓扑以消除输电阻塞和校正电压安全等达成了共识^[8-10], 但对在短期运行调度中发挥电网自身潜力的研究还很少。文献^[11]首次提出正常运行状态下网络拓扑优化, 并将其应用于电网降损实践。文献^[12]提出了输电线路运行状态实时决策以实现市场环境下电网可调度的构想。文献^[13]提出了输电网重构的概念, 通过改变输电网的拓扑结构来降低短路电流和优化系统潮流等。而至今, 正常运行状态下, 在短期运行调度中通过优化电网结构以改善电压支撑水平的研究国内外鲜有报道。

收稿日期: 2014-12-23; 修回日期: 2015-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177091, 51477091); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013CB22-8205)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177091, 51477091) and the National Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB228205)

为此,本文首先分析了电压支撑的特点,并就新形势下电网电压支撑面临的几个问题予以分析,随之给出了考虑电网拓扑优化的电压支撑决策模型及其求解方法,最后以含风电的 IEEE 118 节点系统为例对本文所提方法进行了有效性验证。

1 电压支撑决策及其特点

具有主动励磁调节能力的同步发电机组是电力系统中本质质的电压支撑源,电网中任一节点电压均是以发电机机端电压为参考而分布的,因此其可视为广义的电枢反应的结果。电压支撑决策的难点在于利用少量的控制量跟踪控制数倍于控制量的母线电压状态量,是不完全可控问题,而电压控制得以实施的条件是母线电压允许的波动范围是相对宽松的,即电压约束具有“软约束”特性,这是人造电力系统在一定条件下实现自动运行的技术基础。电压支撑决策实际上就是各机端电压之间的协调并辅以电网参数感性、容性分布的调整(在此统称柔性控制技术,包括变压器分接头调整、灵活补偿与控制),即主动电压支撑源与柔性控制技术之间体现为合作的关系。因此,电网电压支撑是主动电压支撑与柔性控制技术有机统一、协调合作的结果。

实际上,电网拓扑架构对电网电压支撑具有重要作用,固定电网结构限制了电网电压调控能力的发挥,仅依赖于源的调整的电压支撑方式具有局限性,而电网电压支撑也会出现非同调现象,即一个输配电元件从系统中缺省反而产生一个更优的电压支撑状态。若将电网拓扑优化纳入柔性控制技术范畴,即以输配电元件状态为决策量融入到电压支撑决策模型中势必会增强电网电压支撑的灵活性。此外,传统的优化调度理论框架中把支路载流限制放在有功决策中考虑,无功优化模型中则不再考虑,而实际上无功决策后也会存在支路载流越限的情形^[14],由于本文考虑支路运行状态决策,因此在模型中考虑支路载流限制。

2 新形势下电网电压支撑面临的几个问题

2.1 基于直流潮流的传输路径优化与电压支撑的协调

未来电力系统多变情形下,固定电网结构将使经济调度中源网间关系更多地处于冲突状态^[15],主要是由于电网络的基尔霍夫电压定律(KVL)约束制约了部分输电元件传输容量的发挥,使得经济发电机组发电外送能力受到限制,而若停运部分线路则可释放经济运行机组发电能力从而提高系统运行的经济性,本文把这种现象称为电网经济运行中的非同调现象,即一个输配电元件从系统中缺省反而产生

一个更经济的系统状态。为此,文献[16-18]等提出了融入输电元件状态为决策量的调度方法,即传输路径优化 OTS(Optimal Transmission Switching),但其均是在直流潮流条件下决策的,而忽略了电压支撑的影响。实际上,忽略源平衡的电压支撑的影响势必会影响决策的结果,决策结果在实际中不可行或是在实际中可行但其经济效果比固定电网结构下决策的经济效果差的情况在所难免。因此,拓扑的调整需要电压支撑的验证作保证,直流潮流 OTS 需与电压支撑协调进行。

2.2 双向流问题

配电网中分布式电源的接入改变了传统配电网的纯受端特性,逐步显现有源的特性,而源在时域分布上的不均衡性,如风电的反调峰特性,将逐步打破输配电固有格局,输电和配电难以清晰分离,出现双向流问题。由此,配电网重构、中枢纽调压等问题逻辑化解程度减弱,若仍在固定电网结构下进行电压支撑决策,严重时电压支撑无公共域,会发生顾此失彼的现象。

2.3 轻载问题

风电以分布式大规模接入配网,其具有明显的反调峰特性,即在白天负荷高峰时段风电出力较小,而在夜间负荷低谷时段风电出力大增,由此电网净负荷峰谷差逐渐增大。电力系统短期运行调度的结果是在负荷低谷时段停运部分经济性差的同步发电机组以让位于风电,由此上层高压电网低谷时段处于极度轻载情况,该情况下由于同步机组进相能力有限,即使高压电网电抗设备全部投运,电压水平越上限的情况也会时有发生,威胁系统安全运行。对此,若对电网进行拓扑结构调整,有选择地停运部分线路,对电网电压安全有着积极作用。

3 计及电网拓扑优化的电压支撑决策模型及其求解

3.1 目标函数

以电压水平最好(即电压的偏移量 dU 最小)为目标,即:

$$\min dU = \sum_{i \in N_k} \left(\frac{U_i - U_i^{\text{spec}}}{\Delta U_i^{\text{max}}} \right)^2 \quad (1)$$

其中, N_k 为考核电压节点集合; U_i 、 U_i^{spec} 和 ΔU_i^{max} 分别为考核电压节点 i 的实际电压、期望电压和最大允许电压偏差, $\Delta U_i^{\text{max}} = U_i^{\text{max}} - U_i^{\text{min}}$, 上标 max 和 min 分别表示对应变量的上限值和下限值,下同。

3.2 约束条件

a. 支路功率传输安全约束:

$$\begin{cases} P_{l,ij}^2 + Q_{l,ij}^2 \leq S_l^2 \\ P_{l,ji}^2 + Q_{l,ji}^2 \leq S_l^2 \end{cases} \quad l \in N_l \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_{l,ij} = z_l [U_i^2 g_l - U_i U_j (g_l \cos \theta_{ij} + b_l \sin \theta_{ij})] \\ Q_{l,ij} = z_l [-U_i^2 b_l + U_i U_j (b_l \cos \theta_{ij} - g_l \sin \theta_{ij})] \\ P_{l,ji} = z_l [U_j^2 g_l - U_i U_j (g_l \cos \theta_{ij} - b_l \sin \theta_{ij})] \\ Q_{l,ji} = z_l [-U_j^2 b_l + U_i U_j (b_l \cos \theta_{ij} + g_l \sin \theta_{ij})] \end{cases} \quad (3)$$

其中, S_l 为支路 l 的最大传输容量 ($\text{MV}\cdot\text{A}$); $P_{l,ij}$ 、 $Q_{l,ij}$ 、 $P_{l,ji}$ 和 $Q_{l,ji}$ 分别为支路 l ($l \in N_L$, 其两端节点分别为节点 i 、 j , N_L 为支路集合) 两端的有功和无功功率; z_l 、 g_l 和 b_l 分别为支路 l 的状态、电导和电纳, $z_l=0$ 表示支路停运, $z_l=1$ 表示支路在线运行; U_i 、 U_j 分别为节点 i 、 j 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i 、 j 的电压相角差。

b. 节点功率平衡约束。

任一节点 $i \in N_B$ (N_B 为节点集合), 需满足功率平衡约束:

$$\begin{cases} \sum_{g \in N_G(i)} P_{Gg} + \sum_{k \in N_W(i)} P_{Wk} + \sum_{l \in N_S(i)} P_{l,ji} - \sum_{l \in N_S(i)} P_{l,ij} = \sum_{d \in N_D(i)} P_{Dd} \\ \sum_{g \in N_G(i)} Q_{Gg} + \sum_{k \in N_C(i)} Q_{Ck} + \sum_{l \in N_S(i)} Q_{l,ji} - \sum_{l \in N_S(i)} Q_{l,ij} = \sum_{d \in N_D(i)} Q_{Dd} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $N_G(i)$ 、 $N_W(i)$ 、 $N_C(i)$ 和 $N_D(i)$ 分别为节点 i 上的发电机、风电、无功补偿设备和负荷集合; $N_S(i)$ 和 $N_E(i)$ 分别为以节点 i 为首、末端节点的支路集合; P_{Gg} 、 Q_{Gg} 、 P_{Dd} 和 Q_{Dd} 分别为发电机 g 、负荷 d 的有功和无功功率; P_{Wk} 为风电注入功率; Q_{Ck} 为无功补偿容量。

c. 发电机无功容量范围约束:

$$Q_{Gg}^{\min} \leq Q_{Gg} \leq Q_{Gg}^{\max} \quad g \in N_G \quad (5)$$

其中, N_G 为发电机集合; Q_{Gg} 为机组 g 的无功功率。

d. 节点电压上下限约束:

$$U^{\min} \leq U_i \leq U^{\max} \quad i \in N_B \quad (6)$$

e. 无功补偿容量范围约束:

$$Q_{Ck}^{\min} \leq Q_{Ck} \leq Q_{Ck}^{\max} \quad i \in N_C \quad (7)$$

其中, N_C 为无功补偿设备集合。

f. 有载调压变压器非标准变比运行范围约束。

任一有载调压变压器 $l \in N_T$ (N_T 为有载调压变压器集合), 其变比运行范围需满足以下约束:

$$\begin{cases} t_l^{\min} \leq t_l \leq t_l^{\max} & \eta_l \leq \eta \\ t_l = t_l^0 & \eta_l > \eta_0 \end{cases} \quad (8)$$

其中, t_l^0 为有载调压变压器初始非标准变比; η_0 为设定的变压器负载率门槛值; η 为变压器负载率, 可用式(9)来表示。

$$\eta_l = |I_{l,ij}| / I_l^{\max} \quad (9)$$

式(8)考虑了变压器过负荷闭锁调档限制, 现有调度系统出于安全角度考虑均对高负载率情况下变压器过负荷调档予以限制, 本文首次将其纳入决策中。

式(9)中, 电流 $I_{l,ij}$ 为:

$$|I_{l,ij}| = |Y_l| (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij})^{1/2} \quad (10)$$

其中, Y_l 为变压器支路 l 的导纳。

g. 支路状态限制约束:

$$z_l = 1 \quad l \in N_{L1} \subset N_L \quad (11)$$

其中, N_{L1} 为必须在线运行的支路集合。

h. 拓扑连通性条件:

$$\mathbf{A}_c = \mathbf{E}(n) \quad (12)$$

其中, \mathbf{A}_c 为传递闭包阵 (全连通矩阵)^[19]; $\mathbf{E}(n)$ 为 $n \times n$ 阶全 1 矩阵, n 为系统节点个数。

i. 支路开断数量约束:

$$\sum_{l \in N_L} (1 - z_l) \leq z^{\max} \quad (13)$$

其中, z^{\max} 为由于调控系统控制能力等限制的最大允许开断支路数, 假设各支路初始状态均在线运行。

3.3 模型求解

本文所提模型由遗传算法与非线性原对偶内点法组合求解。遗传算法编码过程中, 若将每一支路状态均对应到染色体的基因位, 将会显著增加遗传操作的复杂度和计算量, 对此, 本文采用一种新的编码方式, 即对选取的待决策的支路编号及其运行状态变量分别记录的编码方式, 具体编码格式可表示为:

$$[l^1 \cdots l^m | z^1 \cdots z^m] \quad (14)$$

采用式(14)所示方式对支路状态变量进行编码, 使得所得到的个体自动满足最大允许支路开断数量的要求。编码的另一特点是针对初始的种群个体以及交叉和变异后的个体不符合拓扑关联性条件的情况进行修正。

3.3.1 网络拓扑连通性判别

式(12)所示的由关联矩阵判别系统拓扑连通性的方法在每次拓扑更改时均需重新形成 $n \times n$ 阶关联矩阵, 然后再由布尔矩阵运算构建传递闭包阵予以判别, 因此, 计算复杂度较大。由于系统允许的支路同时开断数量有限, 为此, 本文基于图论中最小割集的概念以精简计算量, 若系统开断 α 条支路, 开断支路集合 $N_L(\alpha)$, 只需对 $\alpha \times \alpha$ 阶系统连通性判别阵 \mathbf{H}_α 的奇异性进行判别, 若 \mathbf{H}_α 奇异, 则系统解列, 否则连通。关于系统连通性判别阵 \mathbf{H}_α 的具体说明如下。

在直流潮流条件下, 支路传输有功功率与各节点注入功率之间满足线性关系, 即:

$$\mathbf{P}_L = \boldsymbol{\psi}_{n_l \times n} \mathbf{P}_I \quad (15)$$

其中, n_l 为支路数; \mathbf{P}_I 和 \mathbf{P}_L 分别为节点注入有功功率、支路传输有功功率向量; $\boldsymbol{\psi}_{n_l \times n}$ 为 $n_l \times n$ 阶注入转移因子矩阵, 其表征了支路传输有功功率与节点注入功率的灵敏度信息, $\boldsymbol{\psi}_{n_l \times n} = \mathbf{B}_L \mathbf{A} (\mathbf{A}^T \mathbf{B}_L \mathbf{A})^{-1}$, \mathbf{B}_L 为支路电纳对角矩阵, \mathbf{A} 为节点支路关联矩阵。由此可以推知, 若考虑任一支路两端节点电量交易, 则系统各支路传输功率的响应特性可表示为:

$$\boldsymbol{\Phi}_{n_l \times n_l} = \boldsymbol{\psi}_{n_l \times n} \mathbf{A}^T = \mathbf{B}_L \mathbf{A} (\mathbf{A}^T \mathbf{B}_L \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \quad (16)$$

其中, $\boldsymbol{\Phi}_{n_l \times n_l}$ 为功率传输分布因子矩阵, 其元素 $\varphi_{l,m}$ 表征了支路 l 传输有功功率与支路 m 两端节点电量交易的灵敏度信息。若 $|\varphi_{l,l}|=1$, 则显然支路 l 为系统的最小割集。由此可以归纳推知, 当 α 条支路开断后,

该开断支路集合 $N_L(\alpha)$ 为系统最小割集的条件为:

$$\sum_{l \in N_L(\alpha)} |\varphi_{l,m}| = 1 \quad m \in N_L(\alpha) \quad (17)$$

当系统开断 α 条支路时,系统解列的条件就是开断支路集合 $N_L(\alpha)$ 包含至少 1 个最小割集。由文献 [20] 可知,其等价条件即为 $\alpha \times \alpha$ 阶矩阵 H_α 奇异,其中矩阵 H_α 为:

$$H_\alpha = I_\alpha - \Phi_{N_L(\alpha)} = \begin{bmatrix} 1 - \varphi_{1,1} & \cdots & -\varphi_{\alpha,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -\varphi_{\alpha,1} & \cdots & 1 - \varphi_{\alpha,\alpha} \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中,矩阵 I_α 为 $\alpha \times \alpha$ 阶单位阵; $\Phi_{N_L(\alpha)}$ 为由开断支路集合 $N_L(\alpha)$ 构成的功率传输分布因子子阵。

网络拓扑连通性判别的具体流程为:形成各支路均在线情况下的系统功率传输分布因子矩阵 $\Phi_{n \times n}$;由遗传操作获得的开断支路集合 $N_L(\alpha)$,形成对应的功率传输分布因子子阵 $\Phi_{N_L(\alpha)}$;对任意支路 l 、 $m \in N_L(\alpha)$ 判别 $|\varphi_{l,l}|$ 是否为 1,若是则结束,否则判断 $\sum_{m \in N_L(\alpha)} |\varphi_{l,m}|$ 是否为 1,若是则结束,否则形成系统连通性判别阵 H_α ,判断其行列式是否为 0,若是则不连通,否则连通。

3.3.2 非线性原对偶内点法求解

对于式(8)所述的条件约束,其可转化为以下互补约束形式:

$$t_i^{\min} \leq t_i \leq t_i^{\max} \quad (19)$$

$$(t_i - t_i^0)^2 (\eta_i - \eta_0) \leq 0 \quad (20)$$

由此,遗传操作过程中每一个体的评价问题转化成了非线性规划问题:

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{u}, \mathbf{x}) \\ \text{s.t. } g(\mathbf{u}, \mathbf{x}) = 0 \\ \mathbf{h}^{\min} \leq \mathbf{h}(\mathbf{u}, \mathbf{x}) \leq \mathbf{h}^{\max} \end{aligned} \quad (21)$$

其中,控制变量 \mathbf{u} 包括常规机组机端电压 E 、有载调压变压器非标准变比 t 、无功补偿容量 Q_C ;状态变量 \mathbf{x} 包括电压幅值 U 、电压相角 θ 等。

非线性原对偶内点法因其具有收敛可靠、鲁棒性强、对问题规模不敏感等优点,在电力系统优化问题中得到了应用^[21]。内点法通过引入非负松弛变量 (\mathbf{v}, \mathbf{s}) 将不等式约束转化为等式约束 $\mathbf{h}(\mathbf{X}) - \mathbf{h}^{\max} + \mathbf{s} = 0$ 和 $\mathbf{h}^{\max} - \mathbf{h}^{\min} - \mathbf{s} - \mathbf{v} = 0$,其中 $\mathbf{X} = [\mathbf{u}, \mathbf{x}]$ 。并通过引入对数壁垒函数构建增广拉格朗日函数:

$$\begin{aligned} L_\mu = f(\mathbf{X}) - \mathbf{y}^T \mathbf{g}(\mathbf{X}) - \mathbf{z}^T (\mathbf{h}(\mathbf{X}) - \mathbf{h}^{\max} + \mathbf{s}) - \\ \mathbf{w}^T (\mathbf{h}^{\max} - \mathbf{h}^{\min} - \mathbf{s} - \mathbf{v}) - \mu \sum_{i=1}^r \ln v_i - \mu \sum_{i=1}^r \ln s_i \end{aligned} \quad (22)$$

其中, $\mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{w}$ 均为拉格朗日乘子; r 为不等式个数; μ 为壁垒因子。推导式(22)的一阶 KKT(Karush-Kuhn-Tucker)最优性条件,然后由牛顿法求解 KKT 方程,判断对偶间隙 $\delta_{\text{Gap}} = \mathbf{v}^T \mathbf{z} - \mathbf{s}^T \mathbf{w}$ 是否满足收敛条件。

3.3.3 求解流程

本文模型求解的具体流程如图 1 所示。

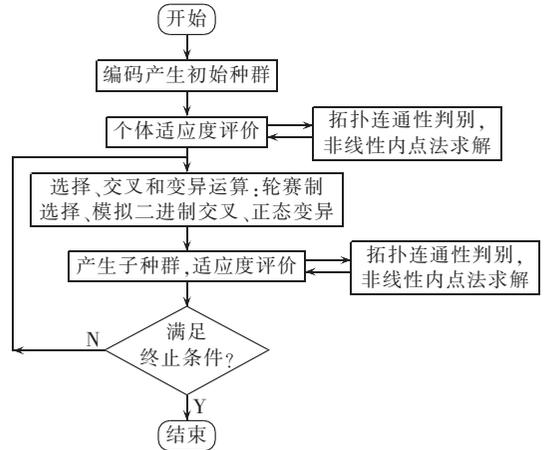


图 1 模型求解流程图

Fig.1 Flowchart of model solving

4 算例分析

4.1 算例系统

以含风电的 IEEE 118 节点系统为例,风电场位置以及风功率数据见表 1,IEEE 118 节点系统由 118 条母线、19 台发电机、99 个负荷以及 186 条输电支路组成,具体数据参见文献[17]。目前风力发电大多采用可实现变速恒频的风电机组,其具有四象限调节特性,可按照调度机构给定的功率因数运行,本文中为简化分析,假设风电场以单位功率因数运行。分高峰和低谷 2 种运行模式分析,高峰模式负荷取文献[17]中给定功率值,低谷模式负荷取给定功率的 50%。变压器非标准变比初始值取值 1.0。各节点允许的电压运行范围为 0.95~1.05 p.u.。变压器过负荷闭锁调档限制的负载率门槛值设定为 0.8。

表 1 风功率数据
Table 1 Wind power data

节点	风功率/MW	
	低谷模式	高峰模式
1	120	70
19	80	40
27	80	40
34	80	40
56	120	70
114	120	70

4.2 算例分析

4.2.1 直流 OTS 的电压支撑影响机制分析

高峰模式下,OTS 决策具有重大经济意义。最大允许开断支路数不超过 5 的直流 OTS 决策结果汇总如表 2 所示。

表 2 中开断支路数为 0 即对应传统的安全经济调度情况。从表 2 可以看出,随着开断支路数的增

表 2 不同停运支路数下 OTS 结果
Table 2 Results of OTS for different
outage-branch numbers

开断支路数	发电成本/(\$·h ⁻¹)	开断支路集合
0	2221.86	—
1	2060.58	{135}
2	1965.82	{125, 131}
3	1893.32	{131, 136, 150}
4	1638.94	{119, 122, 123, 124}
5	1634.27	{119, 122, 123, 124, 138}

注:直流 OTS 模型参见文献[16];直流 OTS 决策时支路容量取保守值,即实际容量的 85%。

加,系统发电成本降低,其主要原因为部分经济发电机组发电外送能力得到释放。

以最大允许开断支路数分别为 2 和 3 为例予以详细分析,源最优运行方式如表 3 所示。

表 3 高峰模式对应的源最优运行方式
Table 3 Source-optimized operational
pattern for peak-load mode

发电机节点	边际成本/ (\$·MW ⁻¹)	功率/MW		
		case0	case2	case3
10	0.217	550	477.465	550
12	1.052	0	0	0
25	0.434	62.698	186.724	97.378
26	0.308	414	414	414
31	5.882	0	0	0
46	3.448	0	0	0
49	0.467	72.613	261.055	220.922
54	1.724	0	0	0
59	0.606	0	0	0
61	0.588	0.105	0	0
65	0.2493	491	491	491
66	0.2487	492	492	492
69	0.1897	805.2	613.784	676.786
80	0.205	577	577	577
87	7.142	96.384	47.973	42.033
92	10	0	0	0
100	0.381	352	352	352
103	2	140	140	140
111	2.173	136	136	135.881

注:case0、case2、case3 分别表示开断支路数为 0、2、3 的情况。

由表 3 可知,停运支路 {131, 136, 150} 后,节点 25 和 49 上经济机组的发电能力得以释放。基于 case3 源最优运行方式进行电压支撑决策,经计算优化问题在允许的电压范围 0.95~1.05 p.u. 内无可行解。若降低电压约束的下限,直到无功优化问题有解,此时电压约束下限为 0.947 p.u.,对应着无功优化的解处于临界状态^[21],节点电压处于约束下限的节点为节点 84,此时说明了在正常电压允许范围内,直流 OTS 决策限制了节点 84 电压被支撑的水平。

由表 3 可知,停运支路 {125, 131} 后,节点 25 和 49 上经济机组的发电能力得以释放。基于 case2 源最优运行方式进行电压支撑决策,经计算优化问题

在允许的电压范围 0.95~1.05 p.u. 内有可行解。考虑和不考虑变压器过负荷闭锁调档限制约束时的决策结果如表 4 所示,表中最大电压值、最小电压值为标幺值,后同。

表 4 case2 电压支撑决策结果
Table 4 Results of voltage-support
decision-making for case 2

方案	目标值	最大电压值	最小电压值	过负荷变压器		
				支路集合	负载率	变比
考虑过负荷闭锁	0.0522	1.05	0.952	{32, 127}	{0.891, 0.962}	{1, 1}
不考虑过负荷闭锁	0.0397	1.05	0.957	{32, 127}	{0.820, 0.967}	{0.988, 1.004}

由表 4 可以看出 2 种方案下变压器支路 32 和 127 负载率均超过了设定的负载率门槛值。若忽视变压器过负荷闭锁调档限制,则决策的变压器支路 32 和 127 调档指令不予执行,其潮流计算结果表明节点 39 电压低于电压约束下限。由此可以看出,忽略变压器过负荷闭锁调档限制的决策过于冒进。而若在决策中考虑变压器过负荷闭锁调档限制约束,则能保证各节点电压维持在允许的范围内。

4.2.2 考虑电网拓扑优化的电压支撑机制分析

低谷模式下安全经济调度结果如表 5 所示。

表 5 低谷模式对应的安全经济调度结果
Table 5 Results of safe & economic dispatch
for volley-load mode

发电机节点	边际成本/(\$·MW ⁻¹)	功率/MW
10	0.2170	290.0
69	0.1897	805.2
80	0.2050	564.3

注:其他机组决策出力为 0。

基于表 5 所示的源最优运行方式,决策出力为 0 的机组视为停运状态,若不考虑电网拓扑调整进行电压支撑决策,则在允许的电压运行范围内不存在可行解,若把其他机组,如节点 26 上机组视为开启状态则有可行解,即其对应机组组合为电压支撑而开启的状态^[23],实际上该状态往往会降低电网运行的经济性。而采用本文的考虑电网拓扑优化的电压支撑决策模型则可改善这一状况,决策结果见表 6。

表 6 低谷模式电压支撑决策结果
Table 6 Results of voltage-support decision-making for volley-load mode

目标值	最大电压值	最小电压值	开断支路集合
0.0089	1.054	0.977	{37}

实际上,开断支路 37 不仅减少了系统的过剩容性无功,同时释放了节点 10 上机组的无功电压调节能力,机组进相运行能力得以释放,系统电压调节能力得以提升。

5 结论

本文针对新形势下电网电压支撑面临的几个问题,基于电网电压支撑特点,提出了计及电网拓扑优化的电压支撑决策模型,并给出了模型求解方法,特别是对变压器过负荷闭锁调档限制约束和电网拓扑连通性约束进行了特殊处理。分析得到结论如下。

a. 电网拓扑的调整必须得有电压支撑的验证作保证,直流 OTS 需与电压支撑协调进行。

b. 固定电网结构下源平衡的电压支撑能力受到限制。智能电网框架下,在电压支撑决策中考虑输配电元件状态切换,通过优化电网结构能够有效缓解源平衡的电压支撑压力。

c. 出于安全考虑,变压器过负荷闭锁调档限制在电压支撑决策中需要考虑,否则将高估系统的电压调控能力,使决策过于冒进。

本文是对调度电网以提高电网电压支撑能力的初步探索,如何在决策中保证系统满足一定的可靠性指标,仍需要下一步的深入研究。进一步还会将其拓展到考虑时间耦合约束的动态优化决策问题中,前瞻性地决策变压器分接头位置,以有效规避变压器过负荷闭锁限制,在时变过程中揭示调度电网在缓解源网间矛盾中的有效作用,预期会促进新形势下电网电压调控理论的进展。

参考文献:

- [1] LAGONOTTE P, SABONNADIÈRE J C, LEOST J Y, et al. Structural analysis of the electrical system: application to secondary voltage control in France[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(2): 479-486.
- [2] 王威, 韩学山, 王勇. 一种减少生成树数量的配电网最优重构算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 34-38.
WANG Wei, HAN Xueshan, WANG Yong. A distribution network optimal reconfiguration algorithm of reducing the number of spinning trees[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 34-38.
- [3] 陈晓林, 刘俊勇, 宋永华, 等. 考虑运行方式转移过程的无功优化控制[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(7): 94-97.
CHEN Xiaolin, LIU Junyong, SONG Yonghua, et al. Transition-optimized voltage and reactive power control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(7): 94-97.
- [4] 吕春泉. 实现电网 AVC 的几个关键问题的探讨[D]. 济南: 山东大学, 2007.
LÜ Chunquan. The research of some key technology on the application of AVC[J]. Ji'nan: Shandong University, 2007.
- [5] 孙宏斌, 郭庆来, 张伯明. 大电网自动电压控制技术的研究与发展[J]. 电力科学与技术学报, 2007, 22(1): 7-12.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, ZHANG Boming. Research and prospects for automatic voltage control techniques in large-scale power grids[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2007, 22(1): 7-12.
- [6] 赵晋泉, 居俐洁, 罗卫华, 等. 计及分区动态无功储备的无功电压

- 控制模型与方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 100-105.
- ZHAO Jinqun, JU Lijie, LUO Weihua, et al. Reactive voltage control model and method considering partitioned dynamic reactive power reserve[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 100-105.
- [7] 李文沅, 周家启, 谢开贵. 在输电线和变电站组合联结网络中的非同调现象[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 7-11.
LI Wenyuan, ZHOU Jiaqi, XIE Kaigui. Non-coherence phenomenon in combinative transmission line and substation configurations [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 7-11.
- [8] MAZI A A, WOLLENBERG B F, HESSE M H. Corrective control of power system flows by line and bus-bar switching[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1986, 1(3): 258-264.
- [9] ARYA L D, CHOUBE S C, KOTHARI D P. Line switching for alleviating overloads under line outage condition taking bus voltage limits into account[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2000, 22(3): 213-221.
- [10] SHAO W, VITTAL V. Corrective switching algorithm for relieving overloads and voltage violations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(4): 1877-1885.
- [11] BACHER R, GLAVITSCH H. Loss reduction by network switching[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3(2): 447-454.
- [12] O'NEILL R P, BALDICK R, HELMAN U. Dispatchable transmission in RTO markets[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(1): 171-179.
- [13] 高远, 时志雄, 凌晓波. 输电网络重构在上海电网中的运行实践 [J]. 华东电力, 2007, 35(9): 54-57.
GAO Yuan, SHI Zhixiong, LING Xiaobo. Operational practice of transmission network reconfiguration in Shanghai Power Grid [J]. East China Electric Power, 2007, 35(9): 54-57.
- [14] HOJI S, PADILHA A, CONTRERAS J. Reactive control for transmission overload relief based on sensitivity analysis and cooperative game theory[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(3): 1192-1203.
- [15] 刘国静, 韩学山, 杨明. 经济调度中源网间的三种状态分析及验证[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 431-437.
LIU Guojing, HAN Xueshan, YANG Ming. Analysis and verification on three states between source and network in economic dispatch[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 431-437.
- [16] FISHER E B, O'NEILL R P, FERRIS M C. Optimal transmission switching[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(3): 1346-1355.
- [17] HEDMAN K W, O'NEILL R P, FISHER E B, et al. Optimal transmission switching-sensitivity analysis and extensions [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(3): 1469-1479.
- [18] HEDMAN K W, FERRIS M C, O'NEILL R P, et al. Co-optimization of generation unit commitment and transmission switching with N-1 reliability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(2): 1052-1063.
- [19] 华健. 电力系统拓扑分析的高斯消元算法及其研究应用[D]. 济南: 山东大学, 2007.
HUA Jian. The research of Gaussian elimination method in power system topology analysis and its application[J]. Ji'nan: Shandong University, 2007.
- [20] GÜLER T, GROSS G. Detection of island formation and identification of causal factors under multiple line outages[J]. IEEE

Cascading failure simulation and defense strategy considering grid carrying structure

DIAO Su¹, LIU Junyong¹, LIU Youbo¹, LIU Tingjian¹, DING Lijie², BAZARGAN Masoud³

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, China;

3. ALSTOM Grid Research & Technology Centre, Stafford ST17 4LX, UK)

Abstract: A power grid carrying structure model based on complex network and information entropy is proposed, the indexes, such as transmission line carrying capacity, carrying coefficient and whole-grid electrical structure carrying entropy, etc., are defined, and the qualitative relationship between it and the self-organized criticality of power grid is researched. The simulation of IEEE 118-bus system reveals that, the carrying structure can reflect the variation of grid structure and operating state, and there is macroscopic relevance between the carrying entropy variation and the load loss variation, based on which, a bi-level defense strategy against cascading failure is proposed to optimize the fault control and plan the grid development, and a cascading failure simulation model applying the defense strategy is built. A cascading failure simulation for a practical power grid verifies the rationality of the proposed indexes and the comparison of outage cumulative probabilistic distribution curve between with and without defense strategy verifies its effectiveness.

Key words: complex network; cascading failure; carrying entropy; self-organized criticality; defense

(上接第 142 页 continued from page 142)

Trans on Power Systems, 2007, 22(2): 505-513.

[21] WU Y C, DEBS A S, MARSTEN E. A direct nonlinear predictor-corrector primal-dual interior point algorithm for optimal power flows[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 876-883.

[22] 孟祥星, 韩学山, 潘珂. 无功优化问题三类解的物理特性[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(1): 15-20.

MENG Xiangxing, HAN Xueshan, PAN Ke. Physical characteristics analysis on three types of solutions of reactive power optimization problem[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(1): 15-20.

[23] 潘志远, 韩学山, 刘超男. 交流潮流约束下的机组组合求解[J]. 山东大学学报: 工学版, 2012, 42(2): 130-137.

PAN Zhiyuan, HAN Xueshan, LIU Chaonan. Unit commitment considering alternating current power flow constraints[J]. Journal of Shandong University of Technology: Engineering Science, 2012,

42(2): 130-137.

作者简介:



孙东磊

孙东磊(1988—), 男, 山东济宁人, 博士研究生, 主要从事电力系统源网协同理论研究与应用工程应用技术开发工作 (E-mail: sdsudlei@sina.com);

韩学山(1959—), 男, 辽宁大连人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要从事电力系统优化调度、EMS、电力市场领域的研究和教学工作;

张波(1963—), 男, 山东威海人, 教授, 主要从事电力系统运行与控制领域的研究和教学工作。

Voltage-support decision-making model considering power network topology optimization

SUN Donglei, HAN Xueshan, ZHANG Bo

(Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: The voltage support of power system is the result of coordination and cooperation between source (generation units and loads) and grid. The integration of transmission and distribution systems and the bidirectional power flow in power system result in the complex contradiction between source and grid, which causes the incoherent phenomenon in the source-dependent voltage support of power network. A voltage-support decision-making model with the constraint of transformer over-load tap-changing blocking is built and solved by the combination of the genetic algorithm and the nonlinear primal-dual interior point method, which takes the conditional adjustment of power grid structure as a decision-making variable when the source balance mode is given. Case analysis verifies the effectiveness of the proposed method, showing the necessity of implementing the synergy between source and network in future multivariate power system.

Key words: electric power systems; voltage support; incoherence; electric network topology; optimization; smart grid; synergy between source and network