

基于系统等值的电压控制方法

李 鹏¹, 张保会¹, 郝治国¹, 舒 进¹, 汪成根¹, Zhiqian BO²

(1. 西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. AREVA T&D UK Limited, Stafford ST174LX, UK)

摘要: 利用电力网络两母线等值模型进行电压控制方法的研究, 通过控制系统等值电势实现系统电压协调控制。基于此构建电压控制问题的模型及控制策略, 并给出了电压稳定在线预警及控制系统的结构。该方法在线监视系统电压稳定性并选择较危险的节点, 同时能获得各电压源点对危险节点等值电势影响的大小, 与电压控制节点剩余控制能力相结合来选择合理的电压控制节点, 并通过在线求解简单的优化问题获得控制量。基于典型系统的仿真结果表明, 该方法能充分利用系统中的电压支撑能力, 提高系统电压稳定性。

关键词: 电压稳定在线监视; 电压稳定控制; 广域测量; 等值模型

中图分类号: TM 732

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)03-0052-05

0 引言

电网规模的不断扩大和负荷的持续增长, 给电力系统的安全运行带来不少问题, 其中最突出的便是电压失稳引起的大面积停电^[1-3]。电压稳定控制已成为保证现代电力系统正常运行的重要手段, 主要通过控制节点电压、传输功率及负荷来实现, 其主要任务是在系统正常及紧急情况时, 按照一定的控制规律协调系统内的电压控制器, 是维持系统电压水平的重要环节^[2-8]。

广域测量系统由同步相量测量单元和可靠的高速通信网络构成, 它打破了传统测控的死区, 与电力网络等值相结合, 为电压稳定在线监视及实时控制等方面提供了新的手段^[9-15]。

本文基于一种电力网络两母线等值模型进行电压控制方法的研究, 首先从简单系统出发分析了控制思想的出发点; 其次, 利用电力网络两母线等值模型, 构建了电压控制模型, 在此基础上给出控制策略及结构; 最后, 基于典型系统进行仿真验证。

1 电压控制方法的出发点

电力网络中节点电压降低的原因可能是^[1-2]: 电压“源”点电压降低或失去电压调节能力; 系统结构变化导致系统等值阻抗增加, 使得电压降增加; 负荷变化导致其等值阻抗减小。电压控制措施主要通过调整电压(无功)源点来调节系统的电压水平, 或改变网络结构来调节系统电压分布。

利用图 1 所示两母线系统来说明本文电压控制的出发点。由于系统功率传输能力与系统侧电压有很大关系, 通过提高系统侧电压可提高系统电压水平及最大传输功率, 图 2 是系统侧电压 U_s 为 1.0 p.u.、1.05 p.u. 及 1.1 p.u. 时, 恒功率因数 ($Q/P=0.2$) 下的 $P-U$ 曲线 (P, U 为标么值)。当然降低电源和负荷之间的阻抗值, 可取得相似的效果。对于复杂的电力系统, 利用其两母线等值模型, 通过控制电压源点电压提高系统侧等值电势可实现系统电压的协调控制。

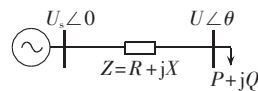
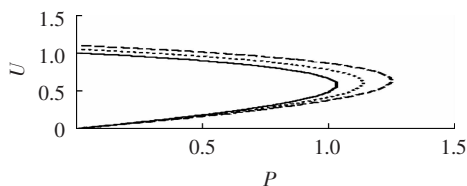


图 1 两节点系统

Fig.1 Two-bus power system



— $U_s=1.0$ p.u., $U_s=1.05$ p.u., ---- $U_s=1.1$ p.u.

图 2 不同系统侧电压时的 $P-U$ 曲线

Fig.2 $P-U$ curves of different sending voltages

2 基于系统等值模型的协调电压控制

2.1 系统等值模型

把电力网络中电压源节点(包括所有的电压支撑节点, 用 α_G 表示)和负荷节点(包括中间连接节点, 用 α_L 表示)分开, 与其相关变量及参数分别以下标 G 和 L 表示, 由网络节点电压方程, 负荷节点电压可表示如下^[12-13]:

$$U_L = Z_{LL} I_L + F_{LG} U_G \quad (1)$$

其中, $Z_{LL} = Y_{LL}^{-1}$, $F_{LG} = -Z_{LL} Y_{LG}$ 。

这种变换本质上是对电力网络的一种多端口戴

收稿日期: 2010-06-11; 修回日期: 2010-12-30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2009CB219700)

Project supported by a Grant from the Major State Basic Research Development Program of China (973 Program) (2009CB219700)

维南等值^[16],其中等值电势为

$$E_{eq} = F_{LG} U_G \quad (2)$$

进一步,节点 $j(j \in \alpha_L)$ 两母线等值模型可表示如下:

$$U_{Lj} = E_{eqj} - Z_{eqj} I_{eqj} \quad (3)$$

$$I_{eqj} = -I_{Lj} - Z_{LLjj}^{-1} \sum_{i \in \alpha_L, i \neq j} Z_{LLji} I_{Li} \quad (4)$$

其中, E_{eqj} 为等值电势; Z_{eqj} 为等值阻抗,等于节点 j 的输入阻抗 Z_{LLjj} ; $Z_{LLji}(i \in \alpha_L, i \neq j)$ 是其他端口对 j 的转移阻抗; I_{eqj} 为等值负荷电流。节点 j 的等值负荷由自身的负荷及其他节点的转移负荷构成:

$$S_{eqj} = U_{Lj} I_{eqj}^* \quad (5)$$

节点 j 的两母线等值系统如图3所示。

利用该两母线等值模型,可进行系统电压不稳定危险程度的评估。进一步,该等值模型不仅可用于电压不稳定的在线监视,更重要的是能为电压稳定控制提供更多有用的信息。

2.2 影响因子

由两母线等值模型式(3)可见,系统侧等值电势与电压源点的电压直接相关,等值电势的组成体现了各电压源点电压对等值电势的影响。在进行电压不稳定监测时,应同时监视那些影响较大的电压源点剩余的调节能力;在进行电压稳定控制时,应优先考虑那些影响较大且有足够控制能力的电压源点。

对于负荷节点 $j(j \in \alpha_L)$,由式(2)可知:

$$E_{eqj} = \sum_{i \in \alpha_G} F_{LGji} \angle(\theta_{Gi} - \theta_{eqj}) U_{Gi} = \sum_{i \in \alpha_G} w_{Gji} U_{Gi} \quad (6)$$

$$w_{Gji} = F_{LGji} \angle(\theta_{Gi} - \theta_{eqj}) \quad (7)$$

其中, w_{Gji} 反映了当前状态下电压源点 $i(i \in \alpha_G)$ 电压对节点 j 等值电势 E_{eqj} 的影响,称为影响因子; w_{Gji} 越大说明该电压源点 i 电压幅值调整会引起 E_{eqj} 较大的变化,这为控制节点的选择提供依据。通过提高电压源点电压幅值进行电压控制,控制调整量不太大时,对 $\angle(\theta_{Gi} - \theta_{eqj})$ 的影响很小,数值仿真结果也验证这一点,可以忽略其对等值电势的影响,则当前状态下电压源点电压变化 $\Delta U_G = (\Delta U_{G1}, \dots, \Delta U_{Gn}, \dots)^T (i \in \alpha_G)$ 与等值电势变化 ΔE_{eqj} 近似有如下关系:

$$\Delta E_{eqj} = \sum_{i \in \alpha_G} w_{Gji} \Delta U_{Gi} \quad (8)$$

2.3 危险节点及控制节点的选择

从电压失稳的过程来看,都是从局部开始,导致了整个系统电压下降。电压控制应主要针对那些电压稳定性较差的危险节点,控制节点应具备的条件是:该电压源点有足够的电压控制能力;通过调节该电压源点能有效地改变危险节点的电压水平以及稳定程度^[1-3]。

首先,利用电压不稳定在线监视指标对负荷节点进行排序,挑选出电压稳定性较差的和电压异常低的节点作为危险节点,形成危险节点集 α_c 。本文基于

各负荷节点的两母线等值模型,利用相对阻抗模指标来衡量电压不稳定状况,如下:

$$I_{VSLj} = |Z_{eqj}/Z_{Leqj}| \quad j \in \alpha_L \quad (9)$$

其中, $Z_{Leqj} = U_{Lj}/I_{eqj}$,为节点 j 等值负荷对应的等值阻抗;正常运行时 I_{VSLj} 应远小于1,当 I_{VSLj} 靠近1时,表明节点 j 已比较危险。进一步,系统电压不稳定指标如下:

$$I_{VSL} = \max_{j \in \alpha_L} \{I_{VSLj}\} \quad (10)$$

则危险节点集 $\alpha_c = \{j \mid I_{VSLj} \geq I_{th}, j \in \alpha_L\}$, I_{th} 是门槛值,通过选取合适的 I_{th} 来保证足够的电压稳定裕度。

其次,对于危险节点 $k \in \alpha_c$,将所有电压源点根据影响因子 $w_{Gki}(i \in \alpha_G)$ 的大小进行排序,得到一个按节点 k 电压控制影响大小排序的控制节点序列,并抽出影响较大的且有足够控制能力的几个构成节点 k 的控制节点集 α_{sk} ,则系统电压控制节点集为

$$\alpha_S = \bigcup_{k \in \alpha_c} \alpha_{sk} \quad (11)$$

值得注意的是,同步机是系统中最重要的电压支撑及控制节点,对于电压稳定控制而言,系统严重扰动后,应通过协调防止某些关键发电机失去调节能力。SVC等电压源点的情况类似。因此,需监视电压源点剩余控制能力的大小^[1-3,14],若某电压源点剩余控制能力不足,则其不能作为电压控制节点。电压源点剩余控制能力可用如下指标衡量:

$$I_{VCCI,i} = (R_{g,i}^{\lim} - R_{g,i})/R_{g,i}^{\lim} \quad i \in \alpha_G \quad (12)$$

其中, $R_{g,i}$ 表示当前电压源点 i 所监视的状态,对于同步发电机, $R_{g,i}$ 是励磁电流 $I_{fd,i}$ 或定子电流 $I_{s,i}$,对于SVC可以是等值电纳 $B_{SVC,i}$;上标 $\lim$ 表示相应的限制值;指标 $I_{VCCI,i}$ 表示电压源点 i 的当前状态与其限制值间的相对距离。

2.4 电压控制模型

对于危险节点 $k(k \in \alpha_c)$,设 $U_{Lk,ref}$ 是其控制的目标电压下限,当 $U_{Lk} < U_{Lk,ref}$ 时,通过控制电压源点的电压,使节点 k 的电压 $U_{Lk} \geq U_{Lk,ref}$ 。对于节点 k 的两母线系统假设其等值负荷不变,则 $U_{Lk,ref}$ 对应的等值电势 E'_{eqk} 为

$$E'_{eqk} = \left| U_{Lk,ref} + Z_{eqk} \left(\frac{S_{eqk}}{U_{Lk,ref}} \right)^* \right| \quad (13)$$

当前状态下,为使 $U_{Lk} \geq U_{Lk,ref}$,节点 k 系统侧等值电势需要的最小调整量 d_k 为

$$d_k = E'_{eqk} - E_{eqk} \quad (14)$$

其中, $U_{Lk,ref}$ 可按如下原则选取:对于危险节点 $k(k \in \alpha_c)$,若 $U_{Lk} < U_{Lk,min}$,则取 $U_{Lk,ref} = U_{Lk,min}$, $U_{Lk,min}$ 为节点 k 电压下限;若 $U_{Lk} \geq U_{Lk,min}$,则取 $U_{Lk,ref} = U_{Lk,0}$, $U_{Lk,0}$ 为正常运行时节点 k 的电压。

对于选定的控制节点集 α_S ,根据式(8),控制量 $\Delta U_{CS} = (\Delta U_{G1}, \dots, \Delta U_{Gn}, \dots)^T (i \in \alpha_S)$,应满足如下约束:

$$d_k = \sum_{i \in \alpha_S} w_{Gji} \Delta U_{Gi} \quad (15)$$

计及控制量及其变化率的限制,控制量 ΔU_{GS} 可通过在线求解优化问题获得。为防止优化问题无可行解,将式(15)转化为软约束写入目标函数,则优化问题的数学模型如下:

$$\begin{aligned} \min \quad & f = \sum_{k \in \alpha_c} \left| d_k - \sum_{l \in \alpha_s} w_{Gkl} \Delta U_{Gl} \right|^2 + \sum_{l \in \alpha_s} r_l \Delta U_{Gl}^2 \\ \text{s.t.} \quad & \Delta U_{Gl}^{\min} \leq \Delta U_{Gl} \leq \Delta U_{Gl}^{\max} \quad (16) \\ & U_{Gl}^{\min} \leq U_{Gl} + \Delta U_{Gl} \leq U_{Gl}^{\max} \quad l \in \alpha_s \end{aligned}$$

其中,目标函数第 1 项反映了控制危险节点电压到合理的范围,具有最高的优先级;第 2 项体现了最小化控制代价;权重系数 $r_l > 0 (l \in \alpha_s)$,通过选择其值大小来体现控制目标的优先级。实际中,控制量的实施通过改变初级电压控制器的参考值来实现。对于中长期动态,可以忽略初级电压控制器的动态过程,在控制规律中可认为各电压控制器的电压参考值调整直接反映到其端电压上,即各电压控制器参考值调整量 $\Delta U_{GS\text{ref}} = \Delta U_{GS}$ 。

3 电压控制策略及结构

在线计算电压控制量主要有以下几部分:

- 收集系统信息,计算各负荷节点等值参数及阻抗模指标,并确定危险节点集合 α_c ;
- 计算各电压源点对危险节点的影响因子,结合电压源点剩余控制能力,形成控制节点集 α_s ;
- 计算危险节点等值电势调整量,并通过求解优化问题获得控制输入序列;
- 通过高速可靠的广域通信网络把控制信号传递给各初级电压控制器。

在电压控制中,当系统电压出现危险状况时,首先启动协调电压控制措施,若控制后系统电压能回到正常运行的范围内,则系统稳定运行,进一步可按照一定的原则投入并联电容器等无功补偿,逐步释放同步发电机等设备,保证足够的动态电压调节能力;若系统情况持续快速恶化或所有电压控制节点的控制能力即将耗尽时系统还不能满足运行要求,则执行切负荷等紧急控制措施,阻止系统情况进一步恶化。相应的电压稳定在线监视及控制系统的功能如图 4 所示。其中, I_1 、 I_2 为设定阈值。

该模型及算法可在线直接应用于调度中心,利用系统参数及广域测量系统(WAMS)提供的测量数据,监视及综合评估系统的电压稳定情况,并当系统电压情况危急时制定控制策略,为调度人员提供预警信息和决策支持。

4 仿真算例

4.1 基于 IEEE 3 机 9 节点系统的仿真

首先,采用图 5 所示的简单系统,分别对静态负荷增加及动态负荷微增的情况进行仿真。

算例 1:基于连续潮流计算进行静态仿真。仿

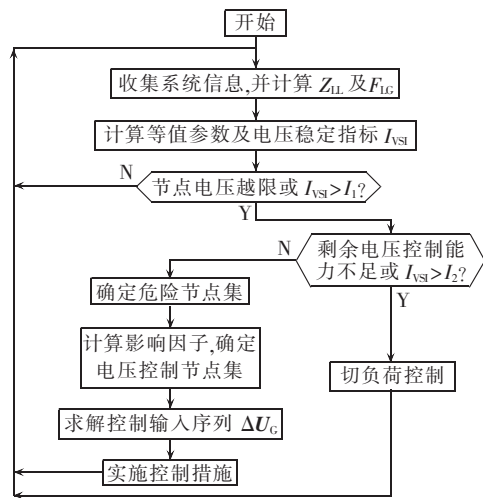


图 4 在线电压稳定控制功能图

Fig.4 Flowchart of online voltage control

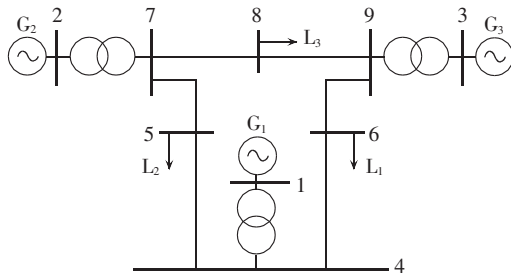


图 5 IEEE 3 机 9 节点系统

Fig.5 IEEE 3-machine 9-bus power system

真中,负荷 L_1 以恒功率因数增加, λ 表示负荷因子,各发电机按其初始出力的比例分担负荷的增加。

图 6 所示为节点 6 的 $P-U$ 曲线。在不同负荷水平下 ($\lambda=0, 5.18$ 及 10.99), 电压源点 $i (i=1, 2, 3)$ 对节点 6 的影响因子 w_{G6i} 示于图 7, 表明各电压源点对节点 6 电压的影响不同, 节点 1 影响最大, 节点 2 最小, 且影响因子随负荷的变化很小。图 6 中控制节点 1、2、3 的电压分别提高 0.05 p.u. 时节点 6 的 $P-U$ 曲线也验证了这一点。可见, 通过提高控制节点电压提高了系统电压水平, 增大系统极限传输功率。

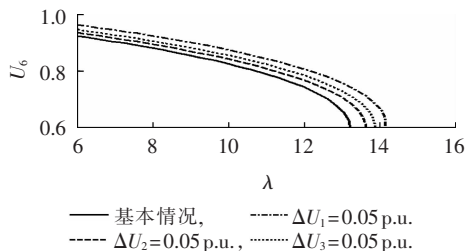


图 6 系统 $P-U$ 曲线

Fig.6 Network $P-U$ curve

算例 2: 动态仿真, 改善负荷微增时的电压稳定性。系统电压要求范围为 0.9~1.15 p.u.; 控制量限制为 0.85~1.2 p.u., 变化率限制为 0.001~0.03 p.u.; 控制周期 $T_s=10$ s; 在式(16)中, 取 $r_l=0.01 (l \in \alpha_s)$, 体现了首要的目标是控制电压到合理的范围。

保持其他负荷不变, 节点 6 负荷以恒功率因数从

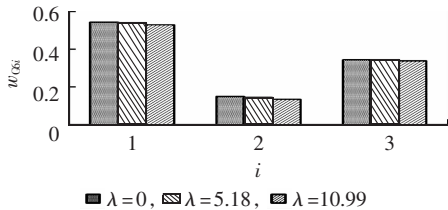


图 7 电压控制节点对节点 6 等值电势的影响因子
Fig.7 Impact factors of voltage control nodes on equivalent potential of node 6

2.0 s 开始增加,初始负荷为 $P_6=0.9$ p.u., $Q_6=0.3$ p.u., 每秒增加初始负荷的 2%。对如下 3 种情形进行仿真:

- a. 无控制情况下的负荷 L_1 持续增加至仿真无法进行,此时 $P_6=2.807$ p.u.;
- b. 有电压控制时,负荷 L_1 持续增加至仿真无法进行,此时 $P_6=3.089$ p.u.;
- c. 有电压控制时, L_1 持续增加至 $P_6=2.807$ p.u.。

图 8 的仿真结果表明,该电压控制使负荷持续微增导致电压崩溃发生的时间由 108.1 s 推迟至 123.6 s,极限功率提高了 10.05%。

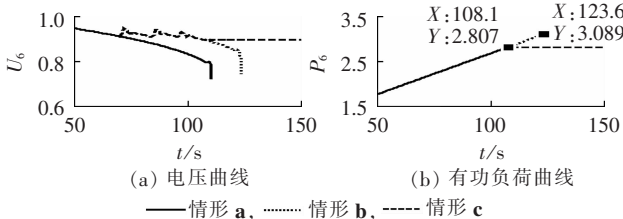


图 8 负荷微增时节点 6 的响应曲线
Fig.8 Voltage and active power response curves of node 6 to slight load increase

对于情形 b,将本文控制方法与传统二级电压控制^[3,5]进行比较,在二级电压控制中系统分为一个区,引导节点为 6。2 种控制方式的仿真结果如图 9 所示,表明本文的控制方法可获得与二级电压控制相似的控制效果,能维持较高的电压水平,增加负荷功率极限,提高动态电压稳定性,其计算更简单,控制更有针对性、更灵活。

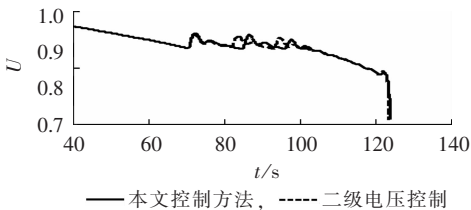


图 9 情形 b 2 种不同电压控制方式下节点 6 电压
Fig.9 Voltage curves of node 6 under two control schemes for case b

图 10 所示为情形 b 下各电压源点 $i(i=1,2,3)$ 对节点 6 的影响因子 w_{G6i} 随时间变化曲线,可见影响因子随系统状态变化很小。

4.2 基于新英格兰 39 节点系统的仿真

为了进一步说明本文控制方法有效性,基于新英

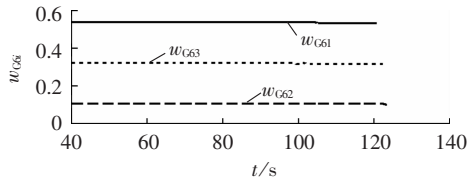


图 10 电压控制节点对节点 6 等值电势的影响因子
Fig.10 Impact factors of voltage control nodes on equivalent potential of node 6

格兰 39 节点系统,如图 11 所示,验证故障情形下的电压控制性能。节点 3、4、7、8、15 及 18 的负荷采用指数恢复模型^[17],其中参数 $\alpha_s=\beta_s=0$, $\alpha_i=\beta_i=2.0$, $T_p=T_q=10.0$ s,其余负荷为恒阻抗负荷。扰动为线路 2-3 在 1.0 s 发生断路,系统响应如图 12 所示。

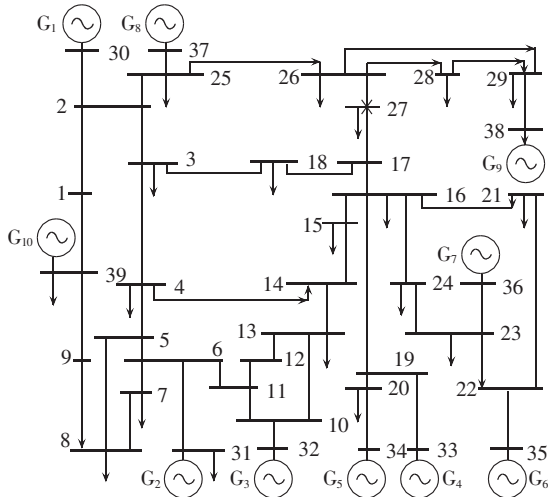


图 11 新英格兰 10 机 39 节点系统
Fig.11 New England 10-machine 39-bus system

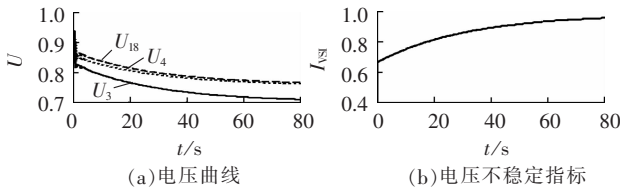


图 12 节点电压及系统电压不稳定指标曲线
Fig.12 Voltage and I_{VSI} curves

可见,由于负荷恢复导致系统电压持续降低,其中节点 3 是最危险节点。故障前及故障后 2 个不同时刻发电机 $G_i(i=1\sim10)$ 对节点 3 等值电势的影响因子 w_{G3i} 如图 13 所示,易见:故障前 G_1 对节点 3 影响最大, G_8 次之;由于线路 2-3 断线,降低了 G_1 和 G_8 与节点 3 联系的紧密程度,使其节点 3 影响大幅降低,故障后节点 3 受 G_2 、 G_3 和 G_6 的影响较大,且随系统状态变化很小。

电压控制分以下 2 种情形:不计及励磁电流限制;计及励磁电流限制。2 种情形下,各控制时刻危险节点集及相应控制节点见表 1,控制节点由有较强控制能力且对各危险节点影响最大的 3 个电压源点并集组成。由图 14 的仿真结果可见,采用电压控制能够充分利用系统中的电压支撑源,有效阻止电压降低。

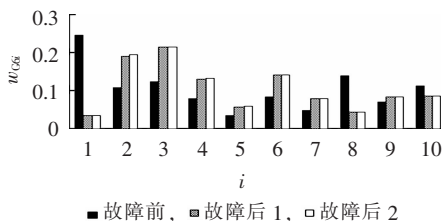


图13 故障前后的影响因子

Fig.13 Impact factors pre- and post-fault

对于考虑电压源点限制的情形,在 $t=34\text{ s}$ 时,对于情形 2,由于 G_3 的控制能力不足,即 $I_{VCL,i}=0.0016 < 0.002$,其不能作为电压控制节点,考虑到 G_3 对节点 3 电压控制最有效,其受限使得对最危险节点的控制效果比情形 1 稍差。

表 1 各控制时刻危险节点及电压控制节点

Tab.1 Critical nodes and voltage control nodes of different control instants

t/s	危险节点	控制发电机 G_i	
		情形 1	情形 2
14.0	3,4,18	2,3,4,6,10	2,3,4,6,10
24.0	3,4,18	2,3,4,6,10	2,3,4,6,10
34.0*	3,4,18	2,3,4,10	2,4,9,10
44.0	3,18	3,4,9,10	4,7,9,10
53.0	3	7,9	7,9

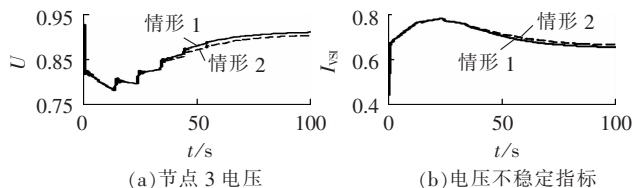


图 14 电压控制下的节点 3 电压及系统电压不稳定指标

Fig.14 Voltage of node 3 and V_{SI} curves under voltage control

以上仿真分析表明,影响因子随系统负荷水平的变化很小,主要受网络结构变化的影响;采用本文电压控制措施能充分利用系统中的电压支撑能力,维持较高的电压水平,提高系统电压稳定性。

5 结语

本文从系统两母线等值模型出发,通过控制系统侧等值电势来提高系统电压水平及功率传输能力,基于此构建了系统电压控制模型及控制策略。该方法可直接应用于调度(控制)中心,结合电压稳定在线预警功能,进行监视电压稳定性的同时,可获得各电压源点对危险节点的影响;综合考虑电压源点的影响大小和剩余控制能力,选择合理的电压控制节点,在有效利用电压控制能力的同时防止电压源点遭遇调节限制。基于典型系统的仿真结果表明,该方法能充分协调利用系统中的电压支撑能力,维持较高的系统电压水平,延缓甚至防止电压崩溃的发生;该方案计算简单,有很好的适应性,能进行自动有效的调整控制,减轻系统紧张情形下运行人员的工作负担。

参考文献:

- [1] TAYLOR C W. 电力系统电压稳定[M]. 王伟胜,译. 北京:中国电力出版社,2002:12-27.
- [2] CUTSEM T V. Voltage stability of electric power systems[M]. NorWell,MA,USA:Kluwer,1998:3-31.
- [3] 周双喜,朱凌志,郭锡玖. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京:中国电力出版社,2004:3-20.
- [4] CUTSEM T V,VOURNAS C D. Emergency voltage stability controls:an overview[C]//IEEE Proceedings of Power Engineering Society General Meeting. Tampa,USA:IEEE,2007:1-9.
- [5] PAUL J P,LEOST J Y,TESSERON J M. Survey of the secondary voltage control in france:present realization and investigations[J]. IEEE Trans on Power Systems,1987,2(2):505-511.
- [6] WEN J Y,WU Q H,TURNER D R,et al. Optimal coordinated voltage control for power system voltage stability[J]. IEEE Trans on Power Systems,2004,19(2):1115-1122.
- [7] 周孝法,高旭. 扩展二级电压控制系统的研究[J]. 电力自动化设备,2003,23(9):31-35.
ZHOU Xiaofa,GAO Xu. Study on extended secondary voltage control of power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(9):31-35.
- [8] 赵兴勇,张秀彬. 先进的高压侧电压控制改善电压稳定性[J]. 电力自动化设备,2007,27(10):43-46.
ZHAO Xingyong,ZHANG Xiubin. Advanced high side voltage control improves voltage stability[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(10):43-46.
- [9] 李大虎,曹一家. 基于同步相量测量的实时电压稳定分析方法[J]. 电力系统自动化,2006,30(12):17-22.
LI Dahu,CAO Yijia. Synchronous phasor measurements based real time voltage stability analysis method[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(12):17-22.
- [10] MILOSEVIC B,BEGOVIC M. Voltage stability protection and control using a wide-area network of phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2003,15(1):121-127.
- [11] ARYA L D,CHOUBE S C,SHRIVASTAVA M. Technique for voltage stability assessment using newly developed line voltage stability index[J]. Energy Conversion and Management,2008,49(2):267-275.
- [12] 姜彤,艾琳,杨以涵. 基于负荷裕度的在线电压稳定指标[J]. 电力自动化设备,2009,29(10):39-42.
JIANG Tong,AI Lin,YANG Yihan. On-line voltage stability index based on load margin[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(10):39-42.
- [13] 随惠斌,赵建国. 基于同步相量测量的电压稳定指标[J]. 电力自动化设备,2008,28(3):5-9.
SUI Huibin,ZHAO Jianguo. Voltage stability index based on synchronized phasor measurement[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(3):5-9.
- [14] 廖国栋,王晓茹. 基于广域量测的电压稳定在线监测方法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(4):8-13.
LIAO Guodong,WANG Xiaoru. An on-line voltage stability monitoring method based on wide area measurement system[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(4):8-13.
- [15] KESSEL P,GLAVITSCH H. Estimating the voltage stability of a power system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1986,1(3):346-352.
- [16] 张伯明,陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京:清华大学出版社,2007:127-134.
- [17] KARLSSON D,HILL D J. Modeling and identification of non-linear dynamic loads in power system[J]. IEEE Trans on Power Systems,1994,9(1):157-163.

(编辑:李 玲)

力系统安全自动装置的相关研究(E-mail:roclarry@yahoo.cn);

张保会(1953-),男,河北魏县人,教授,博士研究生导师,

博士,从事电力系统继电保护、安全自动装置、电力系统通信等方面的研究。

作者简介:

李 鹏(1982-),男,陕西周至人,博士研究生,主要从事电

Voltage control based on power system equivalent model

LI Peng¹,ZHANG Baohui¹,HAO Zhiguo¹,SHU Jin¹,WANG Chenggen¹,Zhiqian Bo²

(1. Xi'an Jiaotong University,Xi'an 710049,China;

2. AREVA T&D UK Limited,Stafford ST174LX,UK)

Abstract: Voltage control is studied with the two-bus equivalent model of power system and the cooperative control of system voltage is realized by the equivalent potential of control system,based on which the model and strategy of voltage control are established and the structure of the online voltage stability warning and control system is presented. It online monitors the voltage stability,selects some critical nodes,evaluates the impacts of voltage source nodes on them,decides the voltage control nodes by considering their remaining voltage control capability,and online solves a simple optimization problem to get the control input. Simulative results for typical systems demonstrate that the proposed strategy makes full use of voltage control capability in power system to improve system voltage stability.

Key words: online voltage stability monitoring; voltage stability control; wide-area measurement; equivalent model