

一种基于多目标的微电网无功优化控制策略

刘保磊, 钟俊

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 微电网中分布式电源的随机性和间歇性特性让电网的稳定性面临严重挑战, 而目前多数针对微电网最优潮流的研究未考虑系统的稳定性和对波动的快速恢复能力。在此基于简化 L 指标的静态无功优化控制策略, 通过建立多目标优化模型系统同时考虑系统经济性、稳定性和动态无功备用最大化, 有效保证了电网运行过程中的电压稳定性和波动的快速恢复。将改进的 IEEE 14 节点系统作为算例进行仿真实验并将所提的多目标函数和传统的经济性目标函数作对比, 结果表明采用所提策略在满足经济性的前提下, 电网的稳定性更好、动态无功备用也更多, 验证了所提方法的有效性。

关键词: 简化 L 指标; 微电网; 最优潮流; 无功电压协调控制; 无功备用

中图分类号: TM761 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2018)02-0001-04

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.02.002

A Reactive Power Optimization Control Strategy Based on Multi-objective for Micro-grid

Liu Baolei, Zhong Jun

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: The randomness and intermittence characteristics of distributed generation make the stability of power grid face serious challenges, but most of the researches on optimal power flow of micro-grid do not consider the stability of the system and the fast recovery of the wave. A static reactive power control strategy based on simplified L indicator is presented, and by establishing the multi-objective optimization model with the consideration of economy, system stability and dynamic reactive power reserve maximization, it effectively guarantees the voltage stability and the rapid recovery of voltage volatility during the operation of power grid. Taking the modified IEEE 14 bus system for example, the simulation experiment and the comparison of multi-objective function and the traditional economic objective function are carried out. The results show that the proposed strategy has better stability and more dynamic reactive power reserve while meeting the demand of economy, which verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: simplified L indicator; micro-grid; optimal power flow; reactive power and voltage coordinated control; reactive power reserve

0 引言

以风能和太阳能为代表的新能源发电具有可再生、无污染、分布广泛等特点, 有极大的研究价值和实用价值^[1]。分布式电源发电具有随机性和间歇性的特点, 因此含分布式电源的电网稳定性较弱, 增加了系统出现电压崩溃的可能性^[2]。目前微电网的经济性和稳定性较差是制约分布式电源发展的

基金项目: 四川省科技支撑计划项目(2016GZ0145)

重要原因, 而很多研究只考虑微电网的经济性却很少考虑系统的稳定性和快速恢复能力。为了保证电网运行的安全, 减少系统出现电压崩溃的可能性, 在微电网控制策略中有必要考虑系统的电压稳定性和波动的快速恢复能力。

基于多目标的微电网无功电压协调控制问题, 众多专家和学者已经进行了很多研究, 也取得了很多成果。文献[3]将微电网的经济性和环境代价最小作为目标函数, 通过动态调度降低微电网的环境污染和发电成本。文献[4]结合储能技术和电网的分时电价政

策 建立微电网的动态调度模型,进一步提高了经济性。文献[5]在目标函数中考虑了最小无功补偿和基于 \$L\$ 指标的电压稳定性,增强了风电场的系统稳定性和经济性,但采用传统的 \$L\$ 指标计算,降低了计算速度。文献[6]讨论了考虑基于 \$L\$ 指标的电压稳定约束的4种模型,对最优潮流模型的选取有一定的指导意义。以上文献均没有在微电网的稳定性中引入简化的 \$L\$ 指标,存在计算量大和计算时间长的缺点,也没有考虑电网运行时因动态无功备用不足导致的系统对波动的快速恢复能力较差的问题。

因此,下面根据微电网中电阻值相对于电抗值不能忽略而相角可以忽略的特点,将文献[7]提出的简化 \$L\$ 指标引入到微电网以衡量电网的稳定性;同时增加了动态无功备用目标函数以增强系统对波动的快速恢复能力。通过建立多目标优化模型系统同时考虑系统经济性、稳定性和动态无功备用,得到的模型更能兼顾微电网经济性、稳定性和对波动的快速恢复能力。

1 \$L\$ 指标及简化 \$L\$ 指标

1.1 \$L\$ 指标

\$L\$ 指标是一个取值范围为 \$0 \sim 1\$,能对不同电力系统模型给出归一化数值的电压稳定指标。在众多常用电压稳定指标中,除 \$L\$ 指标和基于灵敏度分析的电压崩溃临近指标(VCPI)外,其他指标需要判断潮流方程的雅可比矩阵奇异性且计算速度慢。而 VCPI 在系统 SNB 处的数值趋于无穷大,不能定量地给出电压失稳信息[8]。\$L\$ 指标具有计算速度快、物理概念清晰、取值有固定的上下限等优点,且能对不同系统给出归一化数值,在实际电网中已经得到应用。

文献[9]提出 \$L\$ 指标可以表示为

$$L_j = \left| 1 - \frac{\sum_{k \in \alpha_C} H_{LGjk} \dot{V}_{Ck}}{\dot{V}_{Lj}} \right| = \frac{\left| \sum_{i \in \alpha_L} Z_{LLji} \left(\frac{S_i}{\dot{V}_i} \right)^* \right|}{V_{Lj}} \quad (1)$$

式中: \$L_j\$ 为负荷节点 \$j\$ 的局部电压稳定指标; \$\alpha_C\$ 为 PV 节点的集合; \$\alpha_L\$ 为负荷节点的集合 \$j \in \alpha_L\$; \$H_{LGjk}\$ 为负荷参与因子矩阵 \$H_{LG}\$ 的第 \$j\$ 行、第 \$k\$ 列元素; \$\dot{V}_{Ck}\$ 是第 \$k\$ 个 PV 节点电压相量 \$k \in \alpha_C\$; \$\dot{V}_i\$ 和 \$\dot{V}_j\$ 分别为负荷节点 \$i, j\$ 的电压相量; \$V_{Lj}\$ 为节点的电压幅值; \$Z_{LLji}\$ 为负荷节点 \$i\$ 和 \$j\$ 的互阻抗; \$S_i\$ 为节点 \$i\$ 的系统负荷功率; 上角标* 代表共轭。

• 2 •

所有负荷节点的稳定指标共同组成电网的稳定指标向量 \$L' = [L_1, L_2, \dots, L_n]\$, \$n \in \alpha_L\$, 系统的 \$L\$ 指标定义为

$$L = \max_{j \in \alpha_L} |L_j| = \|L'\|_{\infty} \quad (2)$$

式中: \$L\$ 代表系统的 \$L\$ 指标; \$\alpha_L\$ 为负荷节点的集合。

\$L\$ 指标与系统电压稳定性之间的关系有:

$$\begin{cases} L < 1.0, \text{系统电压稳定} \\ L = 1.0, \text{系统处于电压稳定临界状态} \\ L > 1.0, \text{系统电压失稳} \end{cases}$$

1.2 简化 \$L\$ 指标

由 \$L\$ 指标定义,式(2)可以表示为

$$\begin{cases} L_j = \frac{1}{V_j} \sqrt{f^2 + g^2} \\ f = \sum_{i \in \alpha_L} \frac{f_i}{V_i} \\ f_i = P_i (R_{ij} \cos \theta_i - X_{ij} \sin \theta_i) + Q_i (X_{ij} \cos \theta_i + R_{ij} \sin \theta_i) \\ g = \sum_{i \in \alpha_L} \frac{g_i}{V_i} \\ g_i = Q_i (R_{ij} \cos \theta_i - X_{ij} \sin \theta_i) - P_i (X_{ij} \cos \theta_i + R_{ij} \sin \theta_i) \end{cases} \quad (3)$$

式中: \$V_j\$ 等于式(1)中的 \$V_{Lj}\$; \$f\$ 和 \$g\$ 分别表示式(1)中的

\$\sum_{i \in \alpha_L} Z_{LLji} \left(\frac{S_i}{\dot{V}_i} \right)^*\$ 的实部和虚部; \$P_i\$ 和 \$Q_i\$ 分别为节点 \$i\$ 注入的有功功率和无功功率; \$\theta_i\$ 为节点 \$i\$ 的电压相角; \$R_{ij}\$ 和 \$X_{ij}\$ 分别为节点 \$i, j\$ 间的电阻和电抗; \$f_i\$ 和 \$g_i\$ 分别表示 \$Z_{LLji} \left(\frac{S_i}{\dot{V}_i} \right)^* \times V_i\$ 的实部和虚部,其中 \$V_i\$ 为 \$\dot{V}_i\$ 的模值。

由于 \$L\$ 指标的表达式含有复数运算,计算较为复杂,而且随着电网规模的增加,计算量也会快速增加。但在实际低压电网中,线路的电阻相对于电抗往往不能忽略,而电压相位的变化量相对较小[10]。结合微电网中 \$R\$ 相对于 \$X\$ 不能忽略而相角可以忽略的特点采用适合微电网的简化 \$L\$ 指标。忽略电压相位变化量的简化 \$L\$ 指标为

$$\begin{cases} L_{sj} = \frac{1}{V_j} \sqrt{(f_s)^2 + (g_s)^2} \\ f_s = \sum_{i \in \alpha_L} \frac{f_{si}}{V_i} \\ f_{si} = P_i R_{ij} + Q_i X_{ij} \\ g_s = \sum_{i \in \alpha_L} \frac{g_{si}}{V_i} \\ g_{si} = Q_i R_{ij} - P_i X_{ij} \end{cases} \quad (4)$$

式中: \$L_{sj}\$ 表示忽略电压相位变化量后得到的简化 \$L\$

指标; f_s 和 g_s 分别表示式(3)中忽略电压相位变化量后的 f 和 g ; f_{si} 和 g_{si} 分别表示式(3)中忽略电压相位变化量后的 f_i 和 g_i 。

2 电压协调控制

2.1 微电网的优化目标

目前中国全部微电网还属于示范性工程,盈利能力很差。由于分布式电源出力的间歇性和随机性,微电网的稳定性问题不容忽视,而在实际电网运行中动态无功备用常常不足,经常存在出现扰动时系统不能快速恢复的情况^[12]。同时微电网的经济性差和稳定性不好是制约中国微电网发展的重要因素。因此微电网的调度策略既要保证微电网的安全运行,又要考虑运行的经济性和小干扰时系统的动态无功备用。

2.1.1 经济性

由于利用风能、太阳能等可再生能源的发电成本很低,在实际电网中通常优先利用以使发电成本最小化^[13]。因此,这里的经济性函数主要考虑利用非可再生能源发电的传统发电机的发电成本。为满足电网经济性的要求,采用系统运行成本最小作为目标函数:

$$f_1 = \min \sum_i^m (C_{0i} P_{Gi}^2 + C_{1i} P_{Gi} + C_{2i}) \quad (5)$$

式中: m 为微电网中的传统发电机个数; P_{Gi} 为微电网中第 i 台传统发电机的有功出力; C_{0i} 、 C_{1i} 、 C_{2i} 为其燃料耗费曲线参数。

2.1.2 稳定性

微电网包含众多分布式电源,其中利用风能和太阳能的分布式发电机发电具有很强的间歇性,严重影响电网的系统稳定和电压质量。而较差的系统稳定会严重影响系统的安全运行,也会给电网造成难以估量的危害。为增加电网的静态稳定裕度,采用系统中所有的薄弱节点的简化 L 指标平方和作为目标函数:

$$f_2 = \min \sum_{j=1}^l L_j^2 \quad (6)$$

式中: l 为电网中薄弱节点的个数; L_j 表示负荷节点 j 的简化 L 指标。

2.1.3 动态无功备用

由于以风电为代表的分布式电源出力具有间歇性,系统的暂态电压安全问题不容忽视。目前电网

的无功补偿设备有很多,但动作时间差别很大。其中容抗器需要数分钟才能完成动作,风力发电机需要数秒就能完成动作,而静止无功补偿器和静止无功发生器通常只需要数十毫秒就能完成动作^[14]。当电网发生扰动时,以并联电容器为代表的普通无功电源不能满足系统稳定快速恢复的需要,为发挥动态无功备用提高系统暂态电压安全性的作用,需要保证快速动作无功设备的无功储备量。通常动态无功补偿设备处于最佳出力处时动态无功储备量最大^[14],因此采用各动态无功设备出力偏离最佳出力的平方和最小作为目标函数:

$$f_3 = \min \sum_{k=1}^n (Q_k - Q_{kopt})^2 \quad (7)$$

式中: n 为电网中快速动作无功设备的个数; Q_k 为第 k 个快速动作无功设备的无功出力; Q_{kopt} 为第 k 个快速动作无功设备的最佳无功出力,一般为动态无功设备出力上、下限的平均值。

2.2 多目标方程及求解算法

2.2.1 多目标函数

线性加权法可以通过设置相应目标函数的权重系数来设置该目标函数的重要程度。这里利用线性加权法把多目标求最优问题化为单目标求最优问题来处理。权重系数的选取可以结合具体电网的实际情况作出修改。因此多目标函数可以表示为

$$f = \min \left(\sum_i^m (C_{0i} P_{Gi}^2 + C_{1i} P_{Gi} + C_{2i}) + u_1 \sum_{j=1}^l L_j^2 + u_2 \sum_{k=1}^n (Q_k - Q_{kopt})^2 \right) \quad (8)$$

式中 u_1 、 u_2 分别为目标函数 f_2 和 f_3 的权重系数,具体取值根据实际情况而定。

2.2.2 等式约束条件

等式约束条件为电网中各个节点的有功功率和无功功率潮流约束,潮流约束方程的极坐标形式为

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $j \in i$ 表示节点 j 属于和 i 相连的节点集合; P_i 和 Q_i 分别为节点 i 处注入的有功功率和无功功率; V_i 和 V_j 分别为节点 i 和节点 j 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的相角差; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵第 i 行、第 j 列元素的实部和虚部。

2.2.3 不等式约束条件

控制变量的约束包括:微电网中各个发电机有功功率出力的上限、下限约束;各个节点电压的幅值

上限、下限约束;无功补偿设备的补偿上限、下限约束。上述约束可表示为

$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \quad (10)$$

式中: u 为控制变量; u_{\min} 和 u_{\max} 分别为控制变量的下限和上限。

依从变量的约束包括:母线电压幅值的上限、下限约束;各个发电机母线无功功率输出上限、下限约束;各节点间线路的最大传输功率限制。上述约束可表示为

$$h_{\min} \leq h(x, u, D, p, A) \leq h_{\max} \quad (11)$$

式中: x 为依从变量; u 为控制变量; D 为干扰变量或不可控变量; p 为网络元件参数; A 为网络的结构变量,由关联矩阵表示; h 为依从变量组成的向量; h_{\min} 和 h_{\max} 分别为依从变量的下限和上限组成的向量。

2.2.4 求解算法

下面选择内点法作为求解含约束的多目标优化函数的算法。内点法始终在解的可行域内进行寻优,在解决最优解在“突刺点”处无法收敛的问题上效果显著^[15]。同时内点法的计算速度较快且具有良好的收敛性,在实际电网的优化模型求解问题中得到了广泛应用。

3 算例分析

采用改进后的 IEEE 14 节点系统作为算例并利用 Matlab 平台进行仿真,仿真平台硬件配置为主频 3.2 GHz 的英特尔四核处理器和 4 GB 的内存。设定功率基准值为 100 MVA,节点 1、节点 2 为普通发电机节点,节点 6 为风力发电机节点,节点 3 接有容量为 50 Mvar 的无功补偿装置 SVG,其余节点视为负荷节点,母线电压幅值的上限、下限分别为 1.1 和 0.9。下面对仅考虑经济性的传统控制策略(以下简称策略 1)和所提出的控制策略(以下简称策略 2)进行仿真比较和分析,仿真结果见表 1、表 2。

由表 1 和表 2 可以看出:采用策略 1 得到的第 14 节点电压为 0.900 p.u.,处于节点电压幅值约束的下限,易引起电压越限;采用策略 2 得到的各个系统薄弱节点的 L 指标值均比采用策略 1 的更小。由于 L 指标值越小表示系统的稳定性越好,因此采用策略 2 后系统稳定性更好;采用策略 1 得到的动态无功备用仅为 0.26 Mvar,而采用策略 2 得到的动态无功备用为 10.42 Mvar,因此采用策略 2 的电网的

动态无功备用有很大提高;采用策略 1 得到的发电成本相比采用策略 2 时的发电成本较低,因此策略 1 的经济性更好。综上,与传统策略相比,所提出的电压控制策略经济性差别不大,而在电压的稳定性和动态无功备用方面有明显优势。鉴于微电网经常发生小干扰波动且稳定性较差,相比只考虑经济性的传统策略,所提出的电压控制策略综合考虑了微电网的经济性、稳定性和动态无功备用具有很大的优势。

表 1 采用策略 1 的算例仿真结果

系统薄弱节点	电压 (标么值)	L 指标值	发电成本 /元	动态无功备用 /Mvar
5	1.026 5	0.079 8		
7	0.996 7	0.082 1		
9	0.959 1	0.110 6	4 128.6	0.26
10	0.946 3	0.102 4		
14	0.900 0	0.139 7		

表 2 采用策略 2 的算例仿真结果

系统薄弱节点	电压 (标么值)	L 指标值	发电成本 /元	动态无功备用 /Mvar
5	1.028 1	0.079 5		
7	0.998 3	0.081 9		
9	0.960 9	0.110 2	4 347.0	10.42
10	0.948 1	0.102 0		
14	0.901 9	0.139 1		

为比较采用简化 L 指标和 L 指标对仿真结果的影响,下面分别将 L 指标和简化 L 指标应用到策略 2 中稳定性目标的计算,采用策略 2 的算例仿真结果如表 3 所示。

表 3 分别采用 L 指标和简化 L 指标的仿真结果对比

系统薄弱节点	L 指标值		计算时间 /s	
	采用 L 指标	采用简化 L 指标	采用 L 指标	采用简化 L 指标
5	0.079 5	0.079 5		
7	0.081 9	0.081 9		
9	0.110 2	0.110 2	0.337 912	0.308 473
10	0.102 0	0.102 0		
14	0.139 1	0.139 1		

由表 3 可以看出:在策略 2 中采用简化 L 指标和 L 指标计算得到的 L 指标数值相同,即计算得到

(下转第 11 页)

Assessment of Wind Energy Production Connected to the Electric Network Supply [J]. IEEE Proceedings on Generation Transmission and Distribution, 1999, 146(2): 17-19.

[15] 沙非, 马成廉, 刘闯. 变速恒频风力发电系统及其控制技术[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(1): 44-47.

作者简介:

张里(1984), 博士、工程师, 研究方向为风电并网运行与控制;

李红军(1978), 高级工程师, 研究方向为电力系统安全风险评估。

(收稿日期: 2018-01-01)

(上接第4页)

的系统电压稳定性相同; 策略2采用简化L指标比采用L指标计算时间减少9%。因此采用简化L指标在满足计算精度的同时能大幅提高效率, 更加适应控制策略优化计算的需要。

4 结语

由于分布式电源出力的间歇性和随机性特点, 微电网的稳定性和对波动的快速恢复能力较差。上面结合微电网的特点引入简化L指标计算微电网的稳定性不仅提高了计算速度, 更能满足控制策略在线计算的需要。同时所提出的电压控制策略在目标函数中综合考虑了微电网的经济性、稳定性和动态无功备用, 并能通过修改目标函数中相应的权重系数可以灵活地适应微电网的不同运行状态。将改进的IEEE 14节点系统作为算例进行仿真实验, 结果表明提出的控制策略能兼顾微电网的经济性、稳定性和对波动的快速恢复能力, 验证了所提方法的有效性。

参考文献

[1] 罗剑波, 陈永华, 刘强. 大规模间歇性新能源并网控制技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 140-146.

[2] 张谦, 廖清芬, 唐飞, 等. 计及分布式电源接入的配电网静态电压稳定性评估方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 42-48.

[3] 洪博文, 郭力, 王成山, 等. 微电网多目标动态优化调度模型与方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 100-107.

[4] 刘天琪, 江东林. 基于储能单元运行方式优化的微电网经济运行[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 45-50.

[5] 王若松, 马平. 基于L指标的含风电场电力系统无功电压控制[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2016, 31

(1): 73-77.

[6] 贾宏杰, 孙晓彦, 张沛. 基于L指标的电压稳定约束下的最优潮流[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, (1): 34-38.

[7] 陈厚合, 李国庆, 姜涛. 计及静态电压稳定约束的交直流系统可用输电能力[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 75-81.

[8] 姜涛, 李国庆, 贾宏杰, 等. 电压稳定在线监控的简化L指标及其灵敏度分析方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 13-18.

[9] Kessel P, Glavitsch H. Estimating the Voltage Stability of a Power System [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, 1(3): 346-354.

[10] 张建华, 曾博, 张玉莹, 等. 主动配电网规划关键问题与研究展望[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 13-23.

[11] 张海鹏, 林舜江, 刘明波, 等. 低压配电网无功补偿及效益评估系统的开发和应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 129-136.

[12] 孙全才, 程浩忠, 张健, 等. 提高暂态电压安全水平的动态无功备用优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2718-2725.

[13] 王运. 新能源发电优先调度评价技术的研究与应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.

[14] 徐峰达, 郭庆来, 孙宏斌, 等. 基于模型预测控制理论的风电场自动电压控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 59-67.

[15] 卫志农, 季聪, 孙国强, 等. 含VSC-HVDC的交直流系统内点法最优潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 89-95.

作者简介:

刘保磊(1992), 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制;

钟俊(1972), 博士、副教授, 研究方向为电力系统中的信号与信息处理、嵌入式系统等。

(收稿日期: 2018-01-10)