

基于响应度的间歇性电源消纳因素研究

杨瑶¹, 金伟健², 向铁元¹

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 东北大学工程学院, 美国 波士顿 02115)

摘要: 在潮流网络有向图中定义了三种类型节点, 并利用节点之间的区别, 给出了一种全新的顺流潮流跟踪方法。考虑了间歇性电源存在的动态特性及互补性, 利用潮流跟踪结果来定义了响应度, 并给出了它的物理意义。利用响应度作为指标, 从电源侧、配网侧及负荷侧对支撑间歇性电源消纳的因素进行研究。通过对标准 IEEE14 节点系统的测试, 证明了响应度指标的可靠性, 并阐述了各因素对支撑间歇性电源消纳的影响机制。

关键词: 有向图; 潮流跟踪; 间歇性电源; 响应度

Study on support factors of intermittent power supply integration based on responsivity

YANG Yao¹, JIN Wei-jian², XIANG Tie-yuan¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. College of Engineering, Northeastern University, Boston 02115, America)

Abstract: This paper defines three types of nodes to the directed graph in the trend of the network, and by using the difference between nodes, a new method of the downstream power flow tracing is given. Considering the dynamic characteristic and complementary of the intermittent power supply, it defines the responsivity with using the results of power flow tracing and its physical meaning is also given. Using the responsivity as indicators, among the power supply side, the distribution network side and load side, the support factors of intermittent power supply integration are studied. Through the test of standard IEEE14 bus system, the reliability of the responsivity is proved and the influence mechanism to the support factors of intermittent power supply integration is given.

Key words: directed graph; power flow tracing; intermittent power supply; responsivity

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)12-0101-05

0 引言

随着电力行业的蓬勃发展, 常规电源的有限性和环境问题日益突出, 而风电、光伏发电等间歇性电源以其绿色环保、发展前景光明等优点, 已广泛渗透于配电网中; 同时, 带来的间歇性电源消纳^[1-3]问题也备受关注。间歇性电源具有随机性和波动性, 为减小其接入对配电网的安全稳定运行^[4-9]的影响, 通常是利用它的时空分布和动态特性上存在的相关性和广域互补性^[10-12], 建立互补性的电源对进行接入。支撑间歇性电源消纳的因素可以按电源侧、配网侧及负荷侧划分, 而如何找到一个合适的指标, 对各种因素进行分析就显得尤为必要。

本文通过在潮流有向图中定义的三种类型节

点, 给出了一种全新的顺流潮流跟踪^[13-14]方法。考虑了间歇性电源存在的互补性和动态特性, 利用潮流跟踪的结果来定义了响应度, 并给出了它的物理意义。最后, 利用响应度指标, 采用标准 IEEE14 节点系统, 对间歇性电源消纳的因素进行了分析研究, 阐述其影响机制。

1 潮流跟踪

1.1 节点类型定义

在特定的运行态势下, 电力系统网络中的潮流是有方向的, 可以将其看作是一个有向图。根据潮流的流入流出情况, 定义三种类型的节点:

$$v_i = \begin{cases} 1, & \text{潮流仅流出} \\ -1, & \text{潮流有流入, 有流出}(v_i \in G) \\ 0, & \text{潮流仅流入} \end{cases} \quad (1)$$

其中, v_i 为有向图 G 中的节点。显然与发电机相连的母线节点大多属于“1”类节点;“-1”类节点包括变电站母线端、负荷节点及少量的发电机母线节点;“0”类节点为纯负荷节点。

1.2 顺流潮流跟踪

潮流跟踪即是在特定的运行状态下,通过潮流分析和计算,明确发电机或负荷功率在输电元件中的分布情况。系统中一般无自环流,将线路阻抗损耗和充电功率移至线路两端作为等效负荷,变成无损网络。潮流跟踪依据“流”的方向,可分为顺流跟踪和逆流跟踪。根据上节定义的节点类型,实现顺流潮流跟踪的方法如下:

1) 将特定运行态势下的潮流图,按无损等效原则,变成有向图。

2) 标出各节点类型,并列出节点-支路关联矩阵。

3) 从“1”类节点开始,在节点-支路关联矩阵中找到其流经的支路,依次进行潮流分摊等效处理,标记在电路上,然后删去此节点所在矩阵中的行。

4) 如果某条线路下游节点就是“0”类节点,依线路推“1”类节点对其功率的贡献值,然后删去节点-支路关联矩阵中其对应的列;如果下游节点是“-1”类节点,暂保留此线路。

5) 重复步骤3)和步骤4),直至“1”类节点处理尽了。

6) 将“-1”类节点暂保留的流入线路功率合并,并标记各“1”类节点对其功率的贡献值,同时,删去节点-支路关联矩阵中暂保留支路所对应的列;处理后的“-1”类节点改成“1”类节点。

7) 返回步骤3),重复进行,直至只剩下“0”类节点;将计算结果统计,列入表格。

2 间歇性电源的消纳

2.1 间歇性电源的特性

间歇性电源通常是以互补性的电源对的形式接入配电网中,互补性体现了电源间的互补协调能力。对于等效后的有向图而言,互补性可以通过电源对之间的出力组合体现。

对于发电机 G_i 和发电机 G_j 组成互补性的电源对,记作 $D(i, j)$ 。当其接入配电网后,将受到下述约束:

节点电压约束

$$V_{k \min} \leq V_k \leq V_{k \max} \quad (2)$$

接入点容量约束

$$P_{Gi} \leq C_n, P_{Gj} \leq C_m \quad (3)$$

发电机出力约束

$$\begin{cases} P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max} \\ P_{Gj \min} \leq P_{Gj} \leq P_{Gj \max} \end{cases} \quad (4)$$

线路最大传输功率约束

$$P_L \leq P_{L \max} \quad (5)$$

由于间歇性电源出力的随机性和波动性,不同时刻下的电源对之间的出力组合不同,而互补性体现在保证其总出力的平稳性,不同的运行状态下的功率变化,有

$$\begin{cases} \Delta P_{Gi}^{(k)} = P_{Gi}^{(k)} - P_{Gi}^{(0)} \\ \Delta P_{Gj}^{(k)} = P_{Gj}^{(k)} - P_{Gj}^{(0)} \end{cases} (k=0,1,2,\dots) \quad (6)$$

定义集合:

$$H = \{h_k | h_k = \left| \frac{\Delta P_{Gi}^{(k)} + \Delta P_{Gj}^{(k)}}{P_{Gi}^{(k)} + P_{Gj}^{(k)}} \right|, k=0,1,2,\dots\} \quad (7)$$

当 $h_k = 0$ 时,电源对 $D(i, j)$ 两发电机组变化量方向相反、数值相等,变化量恰好完全抵消,达到完全互补;当 $0 < h_k < 1$ 时,变化量存在未抵消部分,其中 h_k 代表非互补的程度^[15]。

保持一致性,定义互补率 φ 为

$$\bar{H} = \{\varphi_k | \varphi_k = 1 - h_k, k=0,1,2,\dots\} \quad (8)$$

为了体现间歇性电源的动态特性,根据式(6)、式(8),定义 $D(i, j)$ 的态势 t 如下:

$$t_k = \begin{cases} -1, & (\varphi_k \rightarrow 1 \text{ 且 } \Delta P_{Gi}^{(k)} > 0) \\ 0, & (\text{选取状态: } P_{Gi}^{(0)}, P_{Gj}^{(0)}) \\ 1, & (\varphi_k \rightarrow 1 \text{ 且 } \Delta P_{Gj}^{(k)} > 0) \end{cases} \quad (9)$$

2.2 响应度

在顺流跟踪节点确定的情况下,进行潮流跟踪,先确定发电机节点对下游线路功率的贡献因子,然后计算顺流节点对其上游线路功率的汲取因子。根据上一节潮流跟踪步骤,令 P 为“-1”类、“0”类负荷节点按顺流排序的流入功率矢量,令 P_G 为“1”类、“-1”类发电机节点按顺流排序的出力功率矢量,并考虑到电源对 $D(i, j)$ 的影响,有

$$\begin{pmatrix} P(-1) \\ \vdots \\ P(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dots & w_{1i} & \dots & w_{1j} & \dots \\ \dots & w_{2i} & \dots & w_{2j} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & w_{ni} & \dots & w_{nj} & \dots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dots \\ P_{Gi}^{(k)} \\ \vdots \\ P_{Gj}^{(k)} \\ \dots \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中:左侧按负荷节点类型分为“-1”类和“0”类; n 表示负荷节点的个数。

3.3 不同互补率的影响

参照图 3 的曲线变化, 选取响应度波动走势较缓的态势 $t = 1$ 作为切入点, 对互补率进行研究。互补率的高低更多的影响着配电网的安全稳定方面的运行, 不同互补率下的响应度变动情况如图 4 所示。

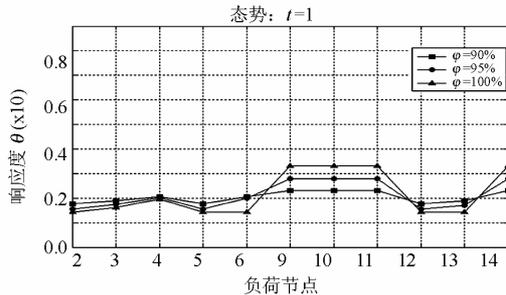


图 4 不同互补率的影响比较

Fig. 4 Comparing the effects of different complementary rates

由图 4 可知, 互补率高普遍能够引起较好的响应度, 而互补率的优势将真正在离电源较远区域负荷节点上得到更好的体现。电源为了响应较远区域的负荷, 潮流通常需流经多条线路, 这会带来多处电压限制、线路潮流限制等问题, 因此, 对较远区域负荷的响应度情况是间歇性电源消纳的一个重要体现; 而互补率高的间歇性电源其对较远区域的负荷响应度也高(如图 4 中的节点 10、11、14), 利用间歇性电源的消纳, 也利于电网的安全稳定运行。

3.3 不同负荷水平的影响

从负荷侧对间歇性电源的消纳进行研究, 暂不考虑电源侧的动态特性(令 $t = 0$) 和互补性(令 $\varphi = 100\%$), 将标准系统下的负荷水平作为最小负荷, 而最大有功和无功负荷均为最小负荷的 200%。负荷水平的影响情况如图 5 所示。

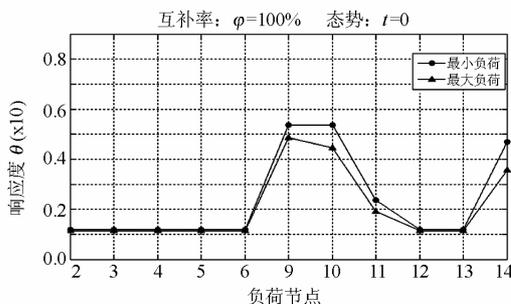


图 5 不同负荷水平的影响比较

Fig. 5 Comparing the effects of different load levels

由图 5 知, 负荷水平的不同, 对离电源较近区域负荷节点响应度的影响不大, 但对较远区域的薄弱负荷节点影响较大(如图 5 中的节点 10、11、14)。一方面可以说明较远区域负荷是影响间歇性电源消

纳的一个原因(上节互补率中也有提到); 另一方面说明通过提高薄弱负荷节点的负荷水平, 响应度虽有降低, 但可以达到增强间歇性电源消纳能力的目的。

4 结论

本文通过定义响应度, 从电源侧、配网侧及负荷侧的角度, 对间歇性电源消纳的因素进行了研究, 可以得到以下结论:

(1) 集中接入模式下, 间歇性电源的动态特性造成响应度的波动, 这是不同于常规电源的地方。

(2) 从配网侧考虑集中、分散接入模式时, 后者更易造成响应度的波动, 利于从全网的角度来支撑间歇性电源的消纳, 这也很好体现了间歇性电源的时空互补性。

(3) 对离电源较远区域负荷的响应能力是制约间歇性电源消纳的重要因素, 而互补率高的间歇性电源可以提高较远区域负荷的响应度, 利于其自身的消纳。

(4) 不同负荷水平下, 离电源较近区域负荷节点响应度的波动不大, 但对较远区域负荷影响较大; 一方面说明较远区域负荷响应度的重要性, 另一方面说明了通过提高薄弱负荷节点的负荷水平以达到增强间歇性电源消纳能力的可行性。

参考文献

- [1] 徐乾耀, 康重庆, 江长明, 等. 多时空尺度风电消纳体系初探[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 28-32. XU Qian-yao, KANG Chong-qing, JIANG Chang-ming, et al. Preliminary analysis on wind power accommodation system from multiple temporal and spatial scale perspective[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 28-32.
- [2] 刘新东, 方科, 陈焕远, 等. 利用合理弃风提高大规模风电消纳能力的理论研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 40(6): 35-39. LIU Xin-dong, FANG Ke, CHEN Huan-yuan, et al. Research on rational wind power casting theory for large-scale wind power integration improvement[J]. Power System Protection and Control, 2013, 40(6): 35-39.
- [3] XIE Le, LIU Ju-hua, NIPUN P. Wind integration in power systems: operational challenges and possible solutions[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 214-233.
- [4] 黄学良, 刘志仁, 祝瑞金, 等. 大容量变速恒频风电机组接入对电网运行的影响分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 142-149.

- HUANG Xue-liang, LIU Zhi-ren, ZHU Rui-jin, et al. Impact of power system integrated with large capacity of variable speed constant frequency wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 142-149.
- [5] 何禹清, 彭建春, 孙芊. 考虑风电能量随机性的配电网可靠性快速评估[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 16-22.
- HE Yu-qing, PENG Jian-chun, SUN Qian. Fast algorithm for distribution system reliability evaluation considering the random energy output of wind power generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 16-22.
- [6] 徐谦, 章坚民, 潘弘. 适应分布式发电接入的配电网规划探讨[J]. 华东电力, 2012, 40(12): 2132-2137.
- XU Qian, ZHANG Jian-min, PAN Hong. Key issues in planning distributed generation integration to distribution network[J]. East China Electric Power, 2012, 40(12): 2132-2137.
- [7] 陈权, 李令冬, 王群京, 等. 光伏发电并网系统的仿真建模及对配电网电压稳定性影响[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 241-247.
- CHEN Quan, LI Ling-dong, WANG Qun-jing, et al. Simulation model of photovoltaic generation grid-connected system and its impacts on voltage stability in distribution grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 241-247.
- [8] 朱星阳, 张建华, 刘文霞, 等. 风电并网引起电网电压波动的评价方法及应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 88-98.
- ZHU Xing-yang, ZHANG Jian-hua, LIU Wen-xia, et al. Evaluation methodology and its application of voltage fluctuation in power network caused by interconnected wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 88-98.
- [9] 马洲俊, 程浩忠, 丁昊, 等. 含不确定性电源的电力系统柔性生产模拟[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 63-70.
- MA Zhou-jun, CHENG Hao-zhong, DING Hao, et al. Flexible production simulation for power system with uncertain energy[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 63-70.
- [10] 姚建国, 杨胜春, 王珂, 等. 智能电网“源—网—荷”互动运行控制概念及研究框架[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 1-6.
- YAO Jian-guo, YANG Sheng-chun, WANG Ke, et al. Concept and research framework of smart grid “source-grid-load” interactive operation and control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 1-6.
- [11] 李洪美, 罗建裕, 万秋兰. 含间歇性电源的发电电源互补优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 34-39.
- LI Hong-mei, LUO Jian-yu, WAN Qiu-lan. Manual complementariness optimization of electrical source involving intermittent power[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 34-39.
- [12] 邓威, 李欣然, 李培强, 等. 基于互补性的间歇性分布式电源在配网中的优化配置[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 216-225.
- DENG Wei, LI Xin-ran, LI Pei-qiang, et al. Optimal allocation of intermittent distributed generation considering complementarity in distributed network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 216-225.
- [13] ABDELKADER S M. Allocating transmission loss to loads and generators through complex power flow tracing[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2007, 1(4): 584-595.
- [14] TANG W J, LI M S, WU Q H, et al. Bacterial foraging algorithm for optimal power flow in dynamic environments[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 2008, 55(8): 2433-2442.
- [15] 曲直, 于继来. 风电功率变化的一致性和互补性量化评估[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 507-513.
- QU Zhi, YU Ji-lai. Quantitative evaluation on consistency and complementarity of wind power variability[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 507-513.
- [16] 程瑜, 董楠, 安甦. 支撑风力发电的需求响应匹配分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 30-34.
- CHENG Yu, DONG Nan, AN Su. Research on demand response matching supporting wind power[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 30-34.
- [17] DE JONGHE C, HOBBS B F, BELMANS R. Optimal generation mix with short-term demand response and wind penetration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(2): 830-839.
- [18] MADAENI S H, SIOSHANSI R. Using demand response to improve the emission benefits of wind[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(2): 1385-1394.

收稿日期: 2013-09-16; 修回日期: 2013-12-15

作者简介:

杨瑶(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: 307170190@qq.com

金伟健(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统状态预测; E-mail: jin.we@husky.neu.edu

向铁元(1953-), 男, 通讯作者, 教授, 博士生导师, 从事电力系统分析计算以及稳定运行与控制的教学和科研。E-mail: tyxiang@whu.edu.cn