

无功调控对暂态功角稳定性的影响

王正风¹, 吴迪²

(1. 安徽省电力调度通信中心, 安徽 合肥 230022;
2. 安徽省电力科学研究院, 安徽 合肥 230022)

摘要: 单机无穷大系统和实际电网的仿真算例表明, 在发电机有功出力不变的情况下, 通过增加临界群发电机组的无功出力可提高电力系统的暂态功角稳定性和输电功率极限。运用等面积法则对其机理进行详细分析并得出结论: 增加发电机的无功出力对系统功角稳定的影响随故障切除时间的改变而改变, 当在故障后的恢复曲线高于初始机械功率时, 其对功角稳定的影响效果明显, 并随着故障切除时间的延迟将逐渐增大, 而切除时间很短时, 增加发电机无功的初始出力对系统功角稳定的影响并不大。仿真结果证明了其正确性和合理性, 从而为电力系统的稳定运行提供了一种灵活的控制手段。

关键词: 无功功率; 暂态功角稳定; 等面积法则

中图分类号: TM 712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2007)06-0063-03

0 引言

电力系统的预防控制是在系统发生故障前采取的措施, 一般通过调节网络参数、控制变量使系统从预想事故的不稳定调整至稳定。暂态功角稳定的预防控制措施一般是通过调节系统网络潮流, 减少不稳定机组的部分有功出力, 或者是通过压负荷的方法保证系统稳定, 此种预防控制被广泛运用于电力系统的稳定运行计算中^[1-4]。事实上, 在研究暂态功角稳定时, 也主要通过各种措施调节有功功率以满足系统的功角稳定要求^[5-10]。

在发电机无功出力方面, 更多的侧重于研究发电机无功功率对电力系统电压稳定性的影响^[11-14]。相对而言, 对无功功率影响系统功角稳定性的研究较少。若能满足系统经济运行的条件和发电机的运行限制, 可不调节机组的有功功率, 而仅通过调节机组的无功功率满足系统的暂态功角稳定性, 这一方面可以充分发掘发电商的潜力, 另一方面也为电力系统提供了一种灵活的运行方式。

1 算例分析

现通过对试验系统和实际系统的计算说明调节发电机组无功功率对系统暂态功角稳定性的影响。

1.1 单机无穷大系统

为了分析简单, 首先对 IEEE 3 节点系统(单机无穷大系统)进行仿真, 单机无穷大系统接线图如图 1 所示。节点 3 为无穷大系统母线, 三相永久性故障发

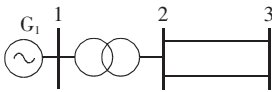


图 1 IEEE 3 节点系统
Fig.1 IEEE 3-bus system

生在双回线 2-3 的一条上, 并发生在 2 端。
当发电机 G_1 发出的有功为 295 MW、无功为 127.2 Mvar 时, 此时系统不稳定, 暂态功角不稳定裕度为 -11.37%, 其功角摇摆曲线和 $P-\delta$ 曲线如图 2、3 所示。

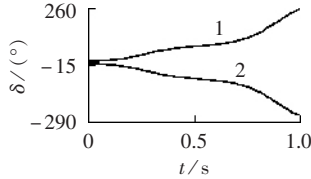


图 2 功角摇摆曲线
Fig.2 Angle swing curve

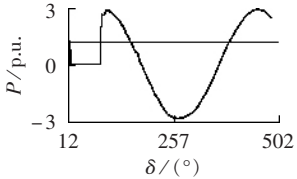


图 3 $P-\delta$ 曲线
Fig.3 $P-\delta$ curve

在图 2 中, 曲线 1、2 分别为发电机 G_1 和无穷大系统的功角摇摆曲线, 可见, 在此种情况下, 系统发生失稳。

由图 3 可见, 由于加速面积远大于减速面积, 系统发生暂态功角失稳。发电机 G_1 的有功出力不变, 仅增加发电机的无功出力时, 即当发电机的无功功率调整到 147 Mvar 时, 系统稳定, 稳定裕度为 100%。此时功角摇摆曲线和 $P-\delta$ 曲线如图 4、5 所示。

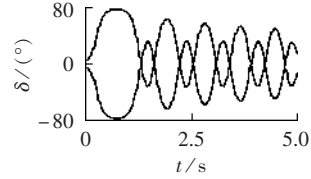


图 4 功角摇摆曲线
Fig.4 Angle swing curve

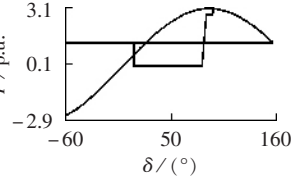


图 5 $P-\delta$ 曲线
Fig.5 $P-\delta$ curve

由图 4 的功角摇摆曲线和图 5 的 $P-\delta$ 曲线可见, 在发电机有功出力不变的情况下, 只增加发电机的无功出力时, 系统的暂态功角稳定性将显著提高, 由初始状态的不稳定变为稳定。

1.2 机理分析

为了分析当发电机的有功出力不增加而只增加发电机的无功时对系统暂态功角稳定性的影响,假定无穷大系统的母线电压保持不变,这样可以得出改变无功功率前后的发电机电势矢量图,如图 6、7 所示。初始状态的发电机各种矢量均用下标 1 表示,而增加发电机无功出力后的发电机各种矢量均用下标 2 表示。

由图 6、7 可见:由于注入(发出)无功功率的增大,使发电机的电势增大,但发电机的功角将由 δ_1 减小到 δ_2 ,这主要是保证发电机的有功功率保持不变。发电机的有功出力可表示为

$$P = E'U \sin \delta / X_{\Sigma} \quad (1)$$

当有功出力不变,而改变无功后的有功为

$$P_1 = \frac{E'_1 U}{X_{1\Sigma}} \sin \delta_1 = P_2 =$$

$$\frac{E'_2 U}{X_{1\Sigma}} \sin \delta_2 \quad (2)$$

由式(2)可见,随着发电机无功功率的增加,发电机的电势增加后,为了保持有功的不变,其功角将减小。

当发生事故时,有功表示为

$$P_{11} = \frac{E'_1 U}{X_{2\Sigma}} \sin \delta_1 = P_{12} = \frac{E'_2 U}{X_{2\Sigma}} \sin \delta_2 \quad (3)$$

当切除故障时,有功表示为

$$P_{11} = \frac{E'_1 U}{X_{3\Sigma}} \sin \delta_3 = P_{12} = \frac{E'_2 U}{X_{3\Sigma}} \sin \delta_4 \quad (4)$$

其中, $X_{2\Sigma}$ 为发生故障时对应的系统阻抗, $X_{3\Sigma}$ 为系统切除故障时对应的系统阻抗,有 $X_{1\Sigma} < X_{3\Sigma} < X_{2\Sigma}$ 。

由式(2)~(4)可见:初始有功值一样,但工作点发生了变化,即增加无功功率后的 $P-\delta$ 曲线发生变化,故其构成的加速面积和减速面积发生变化,如图 8 所示。

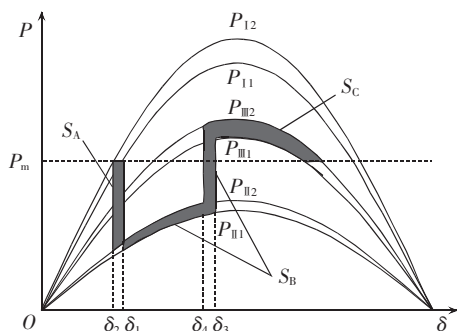


图 8 改变无功功率前后的 $P-\delta$ 曲线

Fig.8 $P-\delta$ curve before and after reactive power output increase

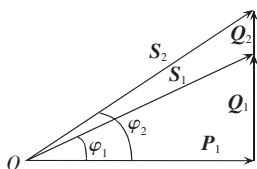


图 6 功率矢量图

Fig.6 Power vector diagram

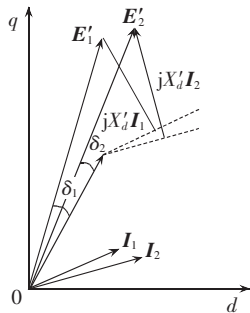


图 7 发电机电势 E 矢量图

Fig.7 Generator vector diagram

图中 P_{11} 、 P_{111} 、 P_{111} 为系统初始状态的故障前、故障中和故障后的有功功率; P_{12} 、 P_{122} 、 P_{122} 为增加无功功率后的故障前、故障中和故障后的有功功率;阴影面积 S_A 为不利于系统稳定的加速面积,阴影面积 S_B 为有助于系统稳定的面积。由图可见 $S_B > S_A$,因此有助于系统的功角稳定。当系统初始状态有功不变的情况下增加无功功率,只要 $S_B > S_A$,则可认为其加速面积减小;同时减速面积增大(S_C),主要表现在曲线在故障切除后比初始时高。这 2 方面共同作用将原初始状态的功角不稳定变为功角稳定,因此这比在发生暂态功角稳定进行强励的作用还要显著,这是因为强励只相当于增加 S_C ,而没有增加 $S_B - S_A$ 的面积。下面分析 $S_B - S_A$ 。

$$S_B - S_A = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_{122} - P_{111}) d\delta + \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_{122} - P_{111}) d\delta - \int_{\delta_2}^{\delta_3} (P_{122} - P_{111}) d\delta \quad (5)$$

其中, $\delta_3 = \omega t_c + \delta_1$, t_c 为故障切除时间。

$$S_B - S_A = \frac{U(E'_2 - E'_1)}{X_{2\Sigma}} (\cos \delta_1 - \cos \delta_4) + \int_{\delta_2}^{\delta_3} \left[\frac{E'_2 U}{X_{3\Sigma}} \sin(\omega t_c + \delta) - P_m + \frac{U E'_2}{X_{2\Sigma}} \sin \delta - \frac{U E'_1}{X_{2\Sigma}} \sin(\omega t_c + \delta) \right] d\delta \quad (6)$$

等式右边第 1 项 $\frac{U(E'_2 - E'_1)}{X_{2\Sigma}} (\cos \delta_1 - \cos \delta_4) > 0$ 。下面分析第 2 项。

情况 1 若 $\frac{E'_2 U}{X_{3\Sigma}} \sin(\omega t_c + \delta) - P_m > 0$, 即功率恢复曲线在机械功率 P_m 之上时,一般故障切除时间不是特别短。

a. 当 $\frac{U}{X_{2\Sigma}} [E'_1 \sin(\omega t_c + \delta) - E'_2 \sin \delta] > 0$ 时,有助于功角稳定的面积显著提高;

b. 当 $\frac{U}{X_{2\Sigma}} [E'_1 \sin(\omega t_c + \delta) - E'_2 \sin \delta] < 0$ 时,只要 $\frac{E'_2 U}{X_{3\Sigma}} \sin(\omega t_c + \delta) - P_m > \frac{U E'_1}{X_{2\Sigma}} \sin(\omega t_c + \delta) - \frac{U E'_2}{X_{2\Sigma}} \sin \delta$, 也增加了有助于系统功角稳定的面积,提高了系统的功角稳定裕度,但相比情况 a 而言,其提高的功角稳定裕度有所下降。

情况 2 若 $\frac{E'_2 U}{X_{3\Sigma}} \sin(\omega t_c + \delta) - P_m < 0$, 即功率恢复曲线在机械功率 P_m 之下时,一般故障切除时间极其短。此时, $\frac{E'_2 U}{X_{3\Sigma}} \sin(\omega t_c + \delta) - P_m + \frac{U E'_1}{X_{2\Sigma}} \sin(\omega t_c + \delta) - \frac{U E'_2}{X_{2\Sigma}} \sin \delta < 0$ 的可能性大为增大, $S_B - S_A$ 的值大为减小,其对功角稳定裕度的提高显著下降。

综上所述可知,增加发电机的无功出力,其对系统功角稳定的影响是伴随着故障切除时间的改变而改变,当在故障后的恢复曲线高于初始机械功率时,其对功角稳定的影响效果明显,并随着故障切除时间的延迟将逐渐增大(注意这是相对于紧急控制情

况下强励的情况),而切除时间很短时,增加发电机无功的初始出力对系统的功角稳定影响并不大。

文献[15]指出,发电机的端电压对系统的稳定影响较大,特别是故障近侧发电机的端电压,并认为故障前仅考虑发电机转子上的有功功率而不考虑发电机的端电压是片面的。事实上,这种现象很好解释:当系统处于正向失稳时,离故障近的机组将获得加速功率而失去同步处于领先群,在发电机有功出力不变的情况下提高领先群机组的机端电压,发电机的初始功角 δ 将减小,这样由上述的分析即可知提高了系统的暂态功角稳定性。

2 安徽电网实例仿真

对安徽电网某高峰期进行实例仿真,当在淮北至五里营发生三相永久性故障,0.15 s 切除故障时,其功角摇摆曲线和 $P-\delta$ 曲线如图9、10所示。

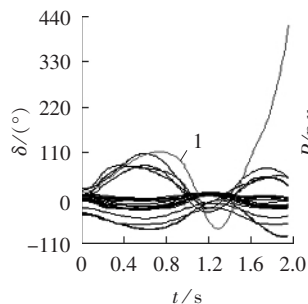


图9 功角摇摆曲线

Fig.9 Angle swing curve

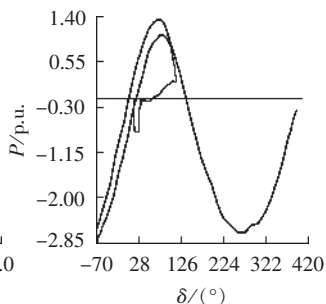


图10 $P-\delta$ 曲线

Fig.10 $P-\delta$ curve

在图9中,曲线1为宿东机组功角摇摆曲线,可见此种情况下,系统发生失稳。此时宿东电厂无功出力为39.7 Mvar,功角不稳定裕度为-43.90%。当调节宿东机组的无功出力,即调节到54 Mvar时,其功角摇摆曲线和 $P-\delta$ 曲线如图11、12所示。

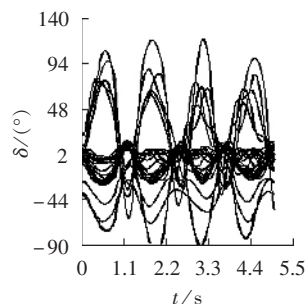


图11 功角摇摆曲线

Fig.11 Angle swing curve

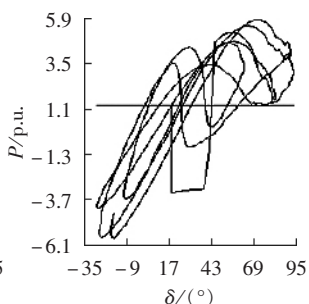


图12 $P-\delta$ 曲线

Fig.12 $P-\delta$ curve

由图11、12可见,在发电机有功出力不变的情况下,只增加发电机的无功出力时,系统的暂态功角稳定性将显著提高,由初始状态的不稳定变为稳定。因此,提高失稳机组的无功出力可改善系统的暂态功角稳定性。

3 结语

在电力系统的暂态功角稳定控制措施中,常见

的是切除机组、切除负荷、快关汽门等,实际上很少有人注意到改变发电机的无功出力,即改变初始状态的无功潮流可有效地提高系统的暂态功角稳定性。因此在系统运行中,可在不违反系统经济运行的前提下通过合理调节发电机的无功功率提高系统的暂态功角稳定性,为实际电网的运行提供灵活的运行方式(可以不必减少发电机组的有功功率或者切除负荷),这具有重要的实践价值和指导意义。

参考文献:

- [1] 薛禹胜,李威. 关于暂态稳定控制决策方法优化的思考[J]. 电力系统自动化,2003,27(10):15-20.
XUE Yu-sheng, LI Wei. A review on the optimization of transient stability controls[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 15-20.
- [2] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [3] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [4] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京:水利电力出版社,1995.
- [5] 夏道止. 电力系统分析[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
- [6] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [7] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1999.
- [8] 韩祯祥. 电力系统稳定[M]. 北京:中国电力出版社,1995.
- [9] 余贻鑫,王成山. 电力系统稳定性理论与方法[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [10] 洪佩孙. 关于电力系统稳定[J]. 江苏电机工程,2002,21(1):44-47.
HONG Pei-sun. Power system stability[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2002, 21(1): 44-47.
- [11] 李天然,王正风,司云峰. 发电机无功功率与系统稳定运行[J]. 现代电力,2005,22(1):37-41.
LI Tian-ran, WANG Zheng-feng, SI Yun-feng. Generator reactive and power system stability[J]. Modern Electric Power, 2005, 22(1): 37-41.
- [12] 周双喜,朱凌志,郭锡玖,等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [13] TAYLOR C W. Power system voltage stability[M]. 北京:中国电力出版社,2001.
- [14] EFTHYMIADIS A E, GUO Y H. Generator reactive limits and voltage stability[C]// Power System Control and Management, the Fourth Conference. London, UK: [s.n.], 1996: 196-198.
- [15] 孙元章,杨新林. 电力系统动态灵敏度计算的伴随方程方法[J]. 电力系统自动化,2003,27(3):6-12.
SUN Yuan-zhang, YANG Xin-lin. Adjoint equation methods for dynamic sensitivity calculation in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(3): 6-12.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:



王正风

王正风(1976-),男,安徽巢湖人,博士,研究方向为电力系统稳定与电力市场(E-mail: wzhenf@163.com; wzhenf@126.com);

吴迪(1972-),男,吉林吉林人,总工程师,高级工程师,硕士,从事电网运行技术管理工作。

(下转第70页 continued on page 70)

Effect analysis of reactive power control on transient angle stability

WANG Zheng-feng¹, WU Di²

(1. Anhui Electrical Power Dispatching & Communication Center, Hefei 230022, China;

2. Anhui Electrical Power Research Institute, Hefei 230022, China)

Abstract: Simulations on a one-machine infinite-bus system and a practical electrical power network show that, with the active power output unchanged, the increase of critical generator reactive power output can improve the transient angle stability and transmission limit. The equal area criterion is applied in the detailed mechanism study and the conclusions are: the effect of generator reactive power output increase on system angle stability is changing along with the fault cutting time. When the resumed active power after fault is larger than the initial mechanical power, the effect is obvious and increases with the time delay of fault cutting. If the cutting time is very short, the effect is little. Simulation results prove its correctness and rationality, which provides a flexible control means for stable power system operation.

Key words: reactive power; transient angle stability; equal area criterion