

利用故障限流器提高电力系统稳定性的控制策略

曾琦¹, 李兴源¹, 温海康²

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2 成都阿尔卡特通信系统有限公司, 四川 成都 610041)

摘要: 电力系统规模的扩大使短路容量增加成为电网发展中的一个日益显著且急待解决的问题, 在馈线及母线连接处安装故障限流器是解决这一问题的有效方法, 不仅如此, 作者认为故障限流器还可以进一步用于系统稳定性的提高。该文利用故障限流器具有可控串联补偿的特点, 采用部分输出量反馈最优控制方法设计了一定的控制规律以改善系统性能。通过对单机无穷大系统的 Matlab 仿真, 证明了该控制方案能有效地减小发电机功角振荡, 提高系统的暂态稳定性。

关键词: 故障限流器; 最优控制; 稳定

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)14-0028-04

0 引言

电力需求的日益增加, 使电力系统的规模逐步扩大。同时, 随着需求方对供电质量要求的提高, 大规模电力系统的稳定性和可靠性都需要进一步改善。而另一方面, 系统规模的扩大将引起短路容量增加, 这时, 如果断路器不能及时有效地切断大的短路电流, 那么, 短路电流将有可能对电力设备造成不良影响^[1]。因此, 研究新的限流方案或限流设备已成为迫切的课题。固态电流限制器采用固态开关快速限制短路电流, 具有动作速度快、允许动作次数多、控制简便、成本低、体积小等优点, 因此在系统中具有较高的实用价值^[2,3]。本文研究了一种带串联补偿的故障限流器, 既具有串联补偿的功能, 又能根据短路的实际情况改变限流程度^[1], 因而具有较大的灵活性和实用性。

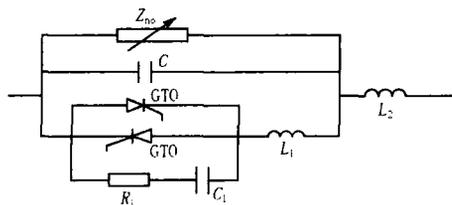


图 1 FCL 的拓扑结构

Fig 1 Topological configuration of FCL

带串联补偿 FCL 的拓扑结构如图 1 所示。正常时, 固态开关 GTO 截止, 负荷电流从电容 C 流过,

由于容抗大于串联电感 L_2 的感抗, 电容 C 对线路起串联补偿作用; 故障时, 固态开关导通, 两个 GTO 轮流导通半周, 旁路电感 L_1 接入, 对 L_1 、C 选择适当的参数, 使感抗大于容抗, 并联后可以得到较大的电抗, 与 L_2 串联后共同限流。

由于新型 FCL 具有可控串联补偿电容器的功能, 其电抗可以在一定范围内快速而连续地变化, 因此, 它不但可以用来补偿线路电抗, 提高传输能力, 还可用于抑制振荡以改善系统的稳定性。目前, 利用可控串联补偿提高系统的稳定性已受到了人们的普遍关注, 并已有该方面的诸多文章, 如文 [4] 介绍了应用变结构控制理论设计可控串联补偿控制器以提高系统的暂态稳定性, 文 [5] 研究了应用邦邦控制规律抑制输电系统低频振荡的方法, 文 [6] 通过能量函数法设计的控制策略有效改善了系统的稳定性。采用变结构控制所得的控制规律的实现一般较困难, 而邦邦控制似乎没有充分利用串联补偿电容器可连续调节的特性。本文为了充分发挥新型 FCL 的可控串联补偿功能, 在输电系统中采用 FCL 保护时, 根据部分输出量反馈最优控制理论设计了一定的控制器, 不但能够限制故障电流, 还可以提高系统的稳定性。

1 利用部分输出量反馈最优控制理论设计控制规律

全状态量反馈最优控制下各个控制器的反馈量必须取全系统的所有状态量或输出量, 而实际上并不是任何情况下全部状态变量都是能够测量或者是易于测量的, 因此, 要取全系统的所有状态量在复杂电力系统中是不容易实现的。解决这种问题的方

基金项目: 国家重点基础研究专项经费项目 (2004CB217907); 国家自然科学基金项目 (50595412); 国家自然科学基金项目 (50177020)

法之一就是采用部分输出反馈构成的控制系统,称为部分输出量反馈最优控制。

设线性定常系统

$$\dot{X} = AX(t) + BU(t) \quad X(0) = X_0 \quad (1)$$

$$y(t) = CX(t) \quad (2)$$

完全能控、能观测,采用如下二次型性能指标泛函:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [X^T Q X + U^T R U] dt \quad (3)$$

其中: X 为 n 维状态向量, U 为 r 维控制向量, y 为 m 维输出向量; Q 与 R 分别为对称的非负定和正定常系数阵。

令控制向量 $U(t)$ 是输出向量 $y(t)$ 的线性函数,即

$$U(t) = -Ky(t) = -KCX(t) \quad (4)$$

进而可得闭环系统的状态方程为

$$\dot{X}(t) = [A - BKC]X(t) = \tilde{A}X(t) \quad (5)$$

式中: $\tilde{A} = A - BKC$ 将反馈律 (4) 代入式 (5), 即可得闭环系统的性能指标泛函:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [X^T \tilde{Q} X] dt \quad (6)$$

其中

$$\tilde{Q} = Q + C^T K^T R K C \quad (7)$$

我们的任务是求得 K , 使性能指标泛函式 (6) 为极小。

根据李雅普诺夫稳定定理, 采用雷文 - 欧萨斯方程求解 $K^{[7]}$ 。

为了“消去”部分输出量最优反馈增益阵 K 对系统初始状态 $X(0)$ 的依赖, 用 P 矩阵的迹作为性能指标即

$$J = \text{tr}[p] \quad (8)$$

定义哈密顿函数为

$$H[p, K] = \text{tr}[p] + \text{tr}\{ \lambda^T [(A - BKC)^T P + P \cdot (A - BKC) + C^T K^T R K C + Q] \} \quad (9)$$

式中: λ 是由 $n \times n$ 个拉格朗日乘子 $\lambda_{ij} (i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, n)$ 组成的对称阵。由此, 可求得使 $\text{tr}[p]$ 取极小值的必要条件为:

$$\frac{\partial H}{\partial K} = 0; \quad \frac{\partial H}{\partial P} = 0; \quad \frac{\partial H}{\partial \lambda} = 0 \quad (10)$$

根据条件 (10), 由式 (9) 分别可得:

$$K = R^{-1} B^T P C^T [C C^T]^{-1} \quad (11)$$

$$I + [A - BKC] + [A - BKC]^T = 0 \quad (12)$$

$$[A - BKC]^T P + P[A - BKC] + C^T K^T R K C + Q = 0 \quad (13)$$

方程式 (11) ~ (13) 被称为雷文 - 欧萨斯方程组。联立求解这一方程组, 即可求得 K, P 和 λ , 进而得到所求的控制规律。

2 带串联补偿故障限流器的部分输出量反馈最优控制器设计

所研究的系统接线情况如图 2 所示。

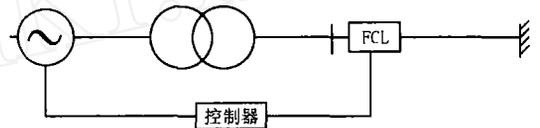


图 2 输电系统示意图

Fig 2 Schematic diagram of transmission system

发电机采用暂态电抗 x_d 后电势 E 恒定、机械功率保持不变的经典模型。发电机的状态方程为:

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_0 \quad (14)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{T_J} (P_m - P_e) \quad (15)$$

式中: δ, ω, P_m, P_e 分别为发电机的转子角度、转子角速度、机械功率和电磁功率, 且对于所研究的系统有:

$$P_e = \frac{E V_s \sin x_{d\Sigma}}{x_{d\Sigma}} \quad (16)$$

式中: V_s 为无穷大母线电压, $x_{d\Sigma}$ 为从发电机到无穷大母线间的总阻抗,

$$x_{d\Sigma} = x_d + x_b + x_{FCL} + x_L \quad (17)$$

设机械功率保持不变, 则发电机状态方程在故障切除前的运行点 $\delta_0, \omega_0, P_{e0}$ 处的增量形式为:

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_0 \quad (18)$$

$$\dot{\omega} = -\frac{1}{T_J} P_e \quad (19)$$

式中: $\delta = \delta - \delta_0, \omega = \omega - \omega_0, P_e = P_e - P_{e0}$ 。

取 P_e 作为控制变量 u , 则可列出如下线性状态方程:

$$\dot{X} = AX(t) + BU(t) \quad (20)$$

状态向量与控制变量分别选择:

$$X = [\delta, \omega]^T, \quad u = P_e \quad (21)$$

为使二次性能指标泛函为最小, 即:

$$\min J = \int_0^{\infty} [X^T Q X + U^T R U] dt \quad (22)$$

将上述已知条件代入雷文 - 欧萨斯方程 (11) ~ (13) 中, 求解该方程便可得到使性能指标泛函为最小的控制为:

$$u = K \tag{23}$$

K 为反馈系数。

由于 $u = P_e = P_e - P_{e0}$, 因此,

$$u + P_{e0} = \frac{E V_s \sin}{x_{d\Sigma}} \tag{24}$$

将式 (23)代入, 经整理可得:

$$x_{FCL} = \frac{E V_s \sin}{P_{e0} + K} - x_d - x_b - x_L \tag{25}$$

式 (25)即为所求的 FCL 部分输出量反馈最优控制规律。

由此, 通过在发电机侧测量转速的变化量, 代入到上式中, 计算出 FCL 的等值阻抗, 再由 FCL 的阻抗确定 L_1 投入的电感值 $L(\)$, 根据式 (26)和 (27) 计算出 GTO 的导通角 α ,

$$L(\) = L_1 \cdot f(\) \tag{26}$$

$$f(\) = \alpha / (\ - \sin \) \tag{27}$$

从而进一步确定脉冲信号的延迟时间, 完成对系统的优化控制。控制系统示意图如图 3。

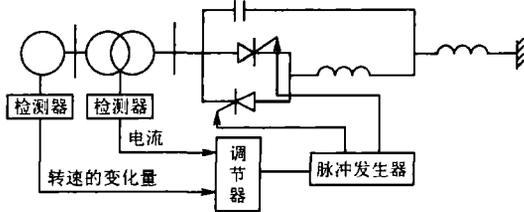


图 3 控制系统示意图

Fig 3 Schematic diagram of control system

3 仿真

为了验证该控制器的有效性, 采用 Matlab 对一个单机无穷大系统进行了仿真。仿真系统示意图如图 4。当输电线上发生三相接地故障时, 快速投入 FCL 限制故障电流, 使故障电流在断路器额定值以内两个周期后断路器切除故障。若故障为瞬时性的, 则重合闸成功, 此时, 从提高系统的稳定性角度出发, 改变 FCL 的控制方式, 进行部分输出量反馈最优控制。

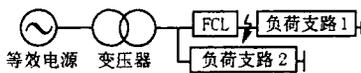


图 4 仿真系统结构图

Fig 4 Configuration of simulation system

发电机参数为: $S_n = 200$ MVA, $U_n = 10.5$ kV, $R_a = 0.001157$ pu, $X_d = 1.92$ pu, $X_q = 1.35$ pu, $X_d' = 0.21612$ pu, $X_q' = 1.65$ pu, $X_d'' = 0.1639$ pu,

$X_q'' = 0.18169$ pu, $T_{d0} = 6.2563$ s, $T_{d0}' = 0.02695$ s, $T_{q0} = 0.07591$ s, $X_0 = 1.45$ pu, $T_J = 5.1$ s

变压器参数为: $S_B = 200$ MVA, $u_s(\%) = 10.8$, $l_0(\%) = 0.8$, $10.5/230$ kV。

线路参数为: $x = 0.28$ Ω /km, $r = 0.02$ Ω /km, $b = 4.804$ μ s/km, 长度 $L = 80$ km。

FCL 参数为: $C = 48.23$ μ F, $L_1 = 52.34$ mH, $L_2 = 103.5$ mH。

没有施加控制的仿真结果如图 5 中细实线 1 所示, 施加了部分输出量反馈最优控制的仿真结果如图中粗实线 2 所示。由图可见, 采用部分输出量反馈最优控制发电机功角振荡减小, 有效改善了系统的稳定性。图 6 为 FCL 的阻抗变化情况。

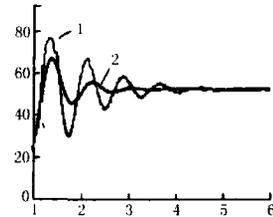


图 5 功角摇摆曲线

Fig 5 Curve of rotor angle

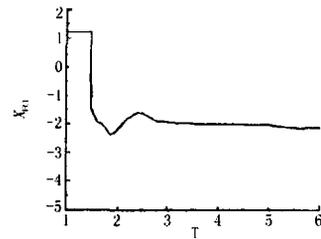


图 6 FCL 阻抗

Fig 6 Impedance of FCL

4 结论

采用部分输出量反馈最优控制理论设计了故障限流器的控制器, 仿真结果表明该控制器有效减小了发电机功角振荡, 提高了系统的稳定性。该控制方案物理意义清晰, 易于实现, 控制效果良好。

参考文献:

[1] 梅军, 郑建勇, 胡敏强, 等. 混合式限流断路器的研究与发展 [J]. 继电器, 2004, 32 (20): 75-80.
MEI Jun, ZHENG Jian-yong, HU Min-qiang, et al. Research and Development of the Hybrid Current Limiting Circuit Breaker [J]. Relay, 2004, 32 (20): 75-80

[2] 章剑峰, 江道灼. 新型桥式固态限流器原理及试验研究 [J]. 继电器, 2003, 31 (10): 4-7.

- ZHANG Jian-feng, JIANG Dao-zhua The Principle and Test on Novel Bridge Solid-state Fault Current Limiter [J]. Relay, 2003, 31(10): 4-7.
- [3] Wang Y, Mohler R R, Spee R, et al Variable Structure FACTS Controller for Power System Transient Stability [A]. IEEE/PES Summer Meeting 1991.
- [4] Jiang F, Choi S S, Shrestha G Damping of Transmission System Oscillations Using Variable Series Compensation [A]. Proceedings of the International Conference on Power System Technology. 1994.
- [5] Groquist J F, Sethares W A, Alvarado F L, et al Power Oscillation Damping Control Strategies for FACTS Devices Using Locally Measurable Quantities [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(3).
- [6] 汪寿基, 王贵德. 现代控制理论及其在电力系统控制中的应用 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1990.
- WANG Shou-ji, WANG Gui-de. Modern Control Theory and Application in Power System Control [M]. Chengdu: Chengdu Science and Technology University Press, 1990.
- [7] Javad H, Mohammadi A, Rasouli M. Fault Current Limiter as a Device to Increase Power Quality [A]. CIGRE Meeting Power Quality-Assessment of Impact India 1997.
- [8] King E F, Chikhani A Y, et al A Microprocessor-controlled Variable Impedance Adaptive Fault Current Limiter [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(4).

收稿日期: 2005-12-16; 修回日期: 2006-03-10

作者简介:

曾琦(1977-),女,硕士,研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: zengqi-hk@163.com

李兴源(1945-),男,博士生导师,教授,中国电机工程学会理事, IEEE高级会员,从事电力系统分析和稳定控制等方面的研究工作。

Control strategy for improving power system stability with FCL

ZENG Qi¹, LI Xing-yuan¹, WEN Hai-kang²

(1. Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Alcatel (Chengdu) Communication System Co., Ltd, Chengdu 610041, China)

Abstract: Installing FLC on feeders and busbar connection point can control short-circuit capacity and enhance system stability facing power system expansion. This paper takes the advantage of thyristor controlled series compensation of FCL and adopts partial output feedback of optimal control strategy to design a control scheme for system performance improving. Matlab simulation on single machine infinite bus system shows that the proposed scheme can effectively reduce the power-angle oscillation of generator and strengthen the system transient stability.

This project is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CB217907) and National Natural Science Foundation of China (No. 50595412 and No. 50177020).

Key words: fault current limiter; optimal control; stability

(上接第 23 页 continued from page 23)

Application of neighbourhood topology based PSO to reactive power optimization

DU Huan¹, ZHAO Bo²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Jiangsu Electric Power Research Institute Corporation Limited, Nanjing 210036, China)

Abstract: A neighbourhood topology based particle swarm algorithm (NTPSO) is proposed for optimal reactive power dispatch and voltage control of power system. The new version of particle swarm, where the individual is affected by the source of influence which is the most successful in its neighbourhood, is more accurate in concept than the canonical particle swarm. The method applies five popular neighbourhood topologies to canonical particle swarm algorithm respectively, in which the square topology has shown better performance than other topologies on a series of benchmark functions. The five NTPSOs are evaluated on both IEEE 30-bus power system and IEEE 57-bus power system in this paper. The simulation results also show that square topology based PSO converges to better solution than the other four NTPSOs. This paper provides a novel way to solve reactive power optimization problem.

Key words: neighbourhood topology based particle swarm algorithm (NTPSO); neighbourhood topology; social networks; reactive power optimization