

基于网络信息的瞬时性故障最佳重合时刻的整定方法 及其实时预测

罗远翔^{1,2}, 孟祥侠³

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083;
3. 华北科技学院, 北京 101601)

摘要: 在支路暂态势能函数的基础上, 根据暂态能量在网络中的分布与系统稳定性之间的关系给出了仅依赖于网络局部信息的瞬时性故障的最佳重合时刻的整定方法。仿真结果表明该方法能改善系统暂态稳定水平, 有效抑制系统振荡。用自适应滤波的时间序列自回归(AR)模型预测算法对此最佳重合时刻进行实时预测。

关键词: 暂态稳定; 最佳重合时刻; 暂态能量; 瞬时性故障; 预测

Setting method and real-time prediction of the optimal reclosing time for an instantaneous fault based on network information

LUO Yuan-xiang^{1,2}, MENG Xiang-xia³

(1. College of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;
2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
3. North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China)

Abstract: Based on the Branch Potential Energy Method(BPEM), the relationship between the distribution of transient energy in network and system stability is analyzed in the paper. Setting method for optimal reclosing time for an instantaneous fault is proposed, which is based on network partial information. The simulation results demonstrate that the method can improve the power system transient stability and damp the system oscillation effectively. At last, the adaptive-filtering time sequence AR prediction algorithm is applied to real-time prediction of the optimal reclosing time.

Key words: transient stability; optimal reclosing time; transient energy; instantaneous fault; prediction

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)02-0013-05

0 引言

目前在电力系统中广泛采用自动重合闸装置, 当断路器跳闸之后, 能自动地将断路器重新合闸即可恢复供电, 从而提高了供电可靠性。现在多数采用保护继电器故障跳闸后经固定延时后重合的方法, 这个固定的延时称为重合闸间歇时间, 一般以整定值常数实现, 逻辑简单。这种传统的重合闸不能区分故障是瞬时性的还是永久性的, 当重合于永久性故障时, 由于故障的第二次冲击可能使电力系统失去稳定性。当瞬时性故障重合成功时, 虽然不会使电力系统不稳定, 但有可能造成重合后电力系统的摇摆幅度增大。文献[1]提出了自适应重合闸, 在正确识别瞬时与永久故障后做出是否重合的决

策。那么是否越快重合越有利于抑制重合后系统后续摆的振荡, 计算和实践表明, 从对系统暂态有利来讲, 存在最佳重合时间^[2-3]。文献[4]将EEAC理论用于最佳重合时刻的计算, 该方法需要将系统最终变换成单机无穷大系统才能进行稳定性分析; 文献[5-6]提出了采用基于小波变换与ANN的最佳重合时间的分析与计算方法, 该方法可以根据实时采集的数据, 在线确定最佳重合时刻。但电力系统的复杂性, 故障的多样性使样本空间庞大, 训练的工作量大; 文献[7-9]提出了对应于重合后系统的暂态能量最小的重合时间为对应于指定运行方式下的最佳重合时间, 但由于该方法以建立于惯性中心坐标系下的系统模型为基础, 将面临发生故障后系统内所有发电机运动信息的采集与通信的困扰。本

文基于支路暂态势能函数^[10]，根据暂态能量网络中分布特性，给出了利用少量局部动态观测信息整定瞬时性故障重合闸时间的整定方法，并对其进行实时预测。

1 重合闸最优时刻的整定方法

1.1 支路暂态势能函数

支路暂态势能法采用多机系统结构保持的拓扑李亚普诺夫函数模型，通过对故障后暂态能量在网络中的分布特性的分析，提取失稳特征量，并构建式(1)。

$$V = V_{KE} + V_{PE} = \frac{1}{2} \sum_{g=1}^m M_g \omega_g^2 + \sum_{k=1}^l \int_{\sigma_k^s}^{\sigma_k} [P_k(u) - P_k^s] du \quad (1)$$

其中： V 表示系统的总能量； V_{KE} 表示系统的总的动能； V_{PE} 表示系统的总的势能； M_g 表示为第 g 台发电机的转动惯量； ω_g 表示为第 g 台发电机的角速度； σ_k 表示为第 k 条支路两端相角差； σ_k^s 为第 k 条支路在故障后平衡状态下的两端相角差； $P_k(\sigma_k)$ 为第 k 条支路有功潮流； $P_k(\sigma_k^s)$ 为第 k 条支路在相对于故障后平衡状态下的有功潮流。则第 k 条支路沿故障后轨迹的势能可表示为：

$$V_{PEk}(\sigma_k) = \int_{\sigma_k^s}^{\sigma_k} [P_k(u) - P_k^s] du \quad (2)$$

当系统某处发生故障时，系统将被注入大量的暂态能量，当系统扰动结束后，系统中的暂态势能将分布于网络中，暂态势能在网络中的某一割集的分集中将导致系统失去稳定。

由于网络对系统的暂态稳定性产生重要的作用，因此，当系统发生故障时，故障线路的切除以及重合能够改变系统的网络结构和参数，从而影响系统的暂态能量分布。大量仿真表明：当系统发生故障时，故障线路的切除（切除后的网络仍为连通图）往往导致包含故障线路的某一个割集成为系统的一个输电瓶颈。因此为了最大程度地改善系统发生故障情况下重合闸动作后的暂态稳定水平，自动重合闸时刻的整定方案的确定，应以重合后包含故障线路的割集所分布的暂态能量最小为原则。

无论是瞬时还是永久故障，都存在阻尼系统摇摆的重合时机，然而最佳重合时机随故障前系统运行状态、故障冲击大小等变化。

1.2 最佳重合时刻的捕捉方法

如图1所示，若网络中的 L_1 发生瞬时性短路故障， t_c 时刻线路两侧开关动作清除故障， t_{rec} 时刻自动重合闸动作线路重合，在此故障序列过程中，

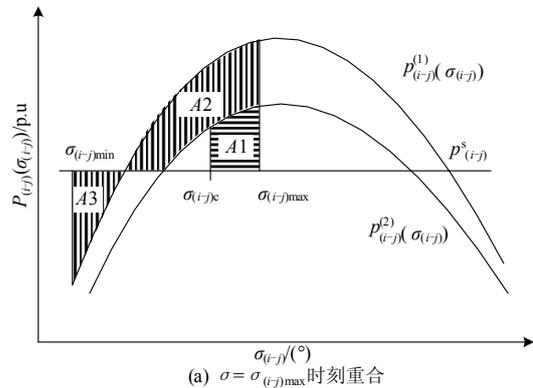
节点 i 、 j 间的电抗的变化导致其间的有功功率发生变化，从而影响该割集的暂态势能的分担水平。



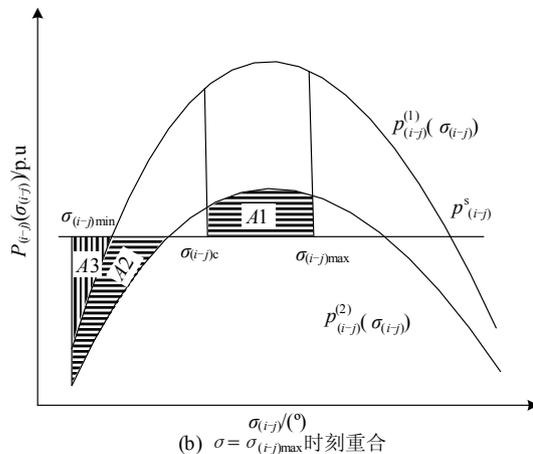
图1 线路开断示意图

Fig.1 Diagrammatic sketch of line breaking

图2为瞬时性故障时对应于不同的重合闸动作时间节点 i 、 j 间的有功功率随相角差的变化曲线。



(a) $\sigma = \sigma_{(i-j)\max}$ 时刻重合



(b) $\sigma = \sigma_{(i-j)\max}$ 时刻重合

图2 对应于不同重合时刻的 p - σ 曲线

Fig.2 Curves of p - σ with respect to different reclosing times

t_c 时刻故障线路切除后，节点 i 、 j 间的有功功率在曲线 $P_{(i-j)}^{(2)}(\sigma_{(i-j)})$ 上变化，如果在 $\sigma_{(i-j)}$ 的第一次振荡过程系统的同步运行在节点 i 、 j 间并未“撕开”，此时该割集的暂态势能的大小为 $P_{(i-j)}^{(2)}(\sigma_{(i-j)})$ 在 $[\sigma_{(i-j)_c}, \sigma_{(i-j)_\max}]$ 区间内的积分，其值为面积A1，若在时刻 $\sigma_{(i-j)\max}$ 重合，重合后有功功率的变化轨迹为

曲线 $P_{(i-j)}^{(1)}(\sigma_{(i-j)})$, 在 $\sigma_{(i-j)}$ 减小的过程中, 则割集的暂态势能变为图2 (a) 中的面积 ($A1+A2$), 由此可见该割集的暂态势能增大, 加剧系统局部能量的不平衡, 从而将恶化系统的暂态稳定性。如果在第一次振荡结束后, $\sigma_{(i-j)min}$ 时刻重合闸动作, 此时该割集的暂态势能的大小, 则由图2 (b) 中的面积 ($A2+A3$) 变化为面积 $A3$, 达到其最小值, 因此有效地抑制了节点 i 、 j 间的暂态势能的变化, 缓解了其遭受暂态势能的冲击程度, 有利于系统暂态稳定性的改善。

因此, 在系统发生瞬时性故障时, 最佳重合闸时间应整定为暂态过程中, 包含故障线路的脆弱割集两端相角差达到最小值的时刻。

2 仿真与分析

为了验证本文给出的瞬时性故障重合闸最优时刻整定方法的有效性, 对单机无穷大系统及多机电力系统发生瞬时性故障时, 重合闸最优时刻的整定进行仿真计算。

2.1 单机无穷大系统

如图3所示单机无穷大系统, 若发生的故障为三相瞬时性故障, 0.1 s 时故障切除, 经仿真表明, 非故障线路两端相角差第一次达到极大值 $\theta_{2-3,max}$ 以及极小值 $\theta_{2-3,min}$ 的时刻分别为 0.91 s 和 2.00 s。假如重合闸的时刻 t_{rec} 分别整定为 0.91 s 和 2.00 s 时, 由系统相平面轨迹, 由图4可见, 在支路两端相角差为最大值时重合, 重合操作的第二次冲击使摇摆幅度更大, 而在支路两端相角差为最小值时重合, 系统摇摆幅度减小, 即此时刻是最佳重合时机。

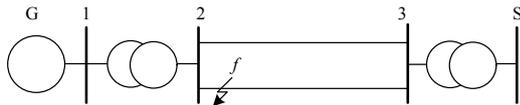
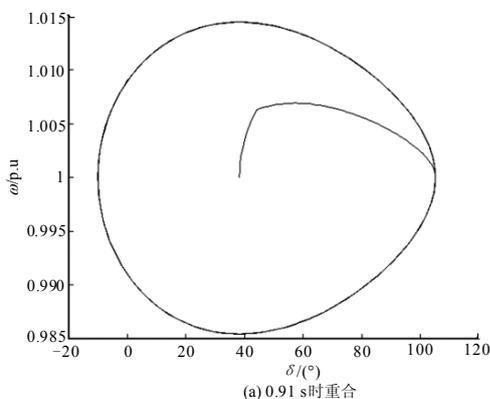
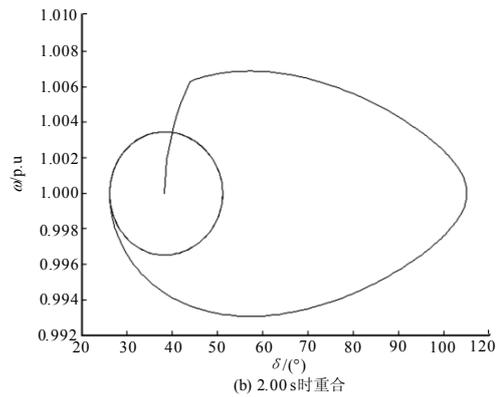


图3 单机无穷大系统

Fig.3 One-machine infinite-bus power system



(a) 0.91 s 时重合



(b) 2.00 s 时重合

图4 相平面曲线

Fig.4 Angular velocity against rotor angle

2.2 多机系统

仿真计算以黑龙江系统为算例系统, 局部网络如图5所示。

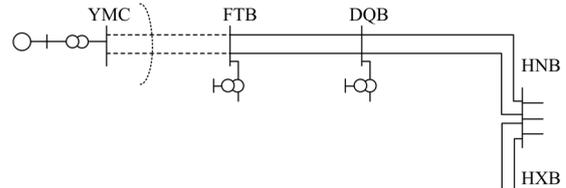
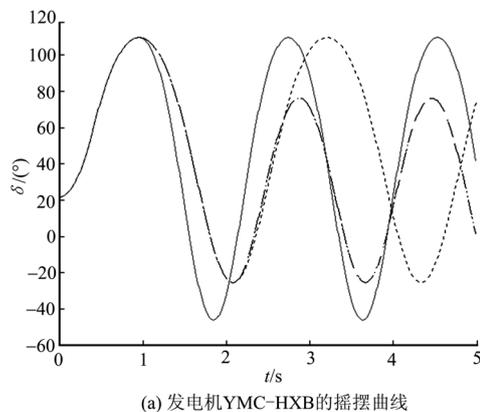


图5 系统局部网络示意图

Fig.5 Diagrammatic sketch of partial power system

若三相瞬时性故障发生在网络中YMC-FTB间 500 kV 双回甲乙线路中的甲线, 0.25 s 甲线两端开关动作切除故障, 经仿真表明, 乙线两端相角差第一次达到极大值 $\theta_{YMC-FTB,max}$ 以及极小值 $\theta_{YMC-FTB,min}$ 的时刻分别为 0.95 s 和 2.08 s。

假如重合闸的时刻 t_{rec} 分别整定为 0.95 s 和 2.08 s 时, 比较在不重合以及 t_{rec} 分别整定为 0.95 s 和 2.08 s 时, 发电机 YMC-HXB 的摇摆曲线以及最后一次操作后节点 YMC-FTB 这个割集的暂态势能的变化幅度, 见图6。



(a) 发电机YMC-HXB的摇摆曲线

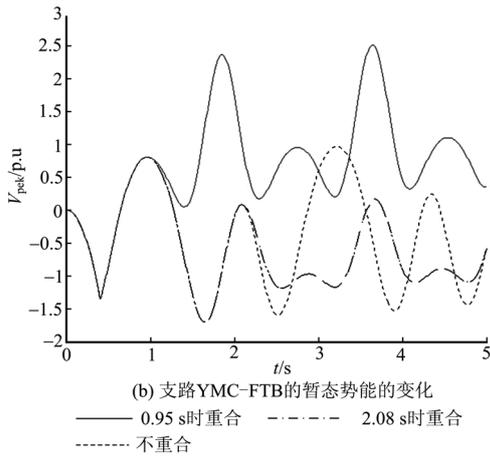


图6 不同重合闸时间的仿真结果
 Fig.6 Simulink result at different reclosing times

设重合后割集上支路暂态能量第一次达到的最大值与第一次达到的最小值之间的差为暂态能量分担量, 计作 Δv_{pek} , 图7为多机系统中不同重合时间与 Δv_{pek} 图7之间的关系。

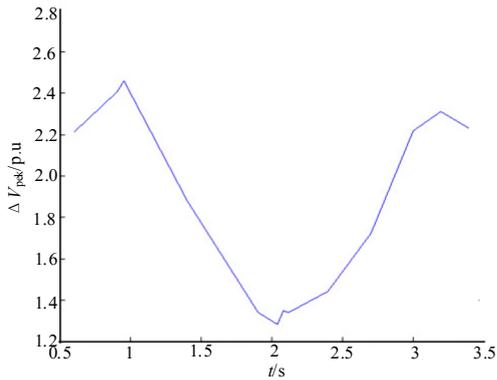


图7 Δv_{pek} 与不同重合时间的关系曲线
 Fig.7 Variation of Δv_{pek} at different reclosing times

由以上的仿真及分析结果可见, 瞬时故障时, 在支路的两端相角差达到最大和最小时重合对该系统的暂态稳定性的影响是截然相反的, 在支路两端相角差为最小时重合, 将会明显提高该系统的暂态稳定性。

3 最优重合闸的实现策略

优选的重合条件由支路两端相角差表示, 随故障前运行条件、故障类型等而变化, 因而必须实时测量, 才能捕捉到最佳重合的机会。进一步分析最佳重合条件, 并不要求精确测量相角差和角速度差, 只要求能正确地预测其变化趋势。本文采用适应性滤波的时间序列自回归 (AR) 模型预测算法对瞬时性故障的最佳重合时刻进行预测。

3.1 预测技术

预测的实质是根据事物发展的规律性, 通过若干个实测数据来构造出较符合实际变化规律的模型, 并不断用新的实测数据来修正该模型, 同时不断地利用这个模型预测将来。下面介绍本文所用到的适应性滤波的时间序列自回归 (AR) 模型预测算法。

对于时间序列 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_t$, 其 P 阶自回归模型为

$$x_t = \phi_1 x_{t-1} + \phi_2 x_{t-2} + \dots + \phi_p x_{t-p} + e_t \quad (3)$$

该式表示 t 时刻预测值可用 t 时刻前 p 个观测值 $x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-p}$ 来预估; $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ 为模型参数; e_t 代表建模误差; 用来体现造成预测误差的所有随机因数。

对于一般的 $AR(p)$ 模型, 自回归系数 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ 要按线性方程组式 (4) 解出。

$$\begin{cases} r_1 = \phi_1 + \phi_2 r_1 + \phi_3 r_2 + \dots + \phi_p r_{p-1} \\ r_2 = \phi_1 r_1 + \phi_2 + \phi_3 r_1 + \dots + \phi_p r_{p-2} \\ \vdots \\ r_p = \phi_1 r_{p-1} + \phi_2 r_{p-2} + \dots + \phi_p \end{cases} \quad (4)$$

其中: r_1, r_2, \dots, r_p 是时间序列的自相关系数。

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x}_t)(x_{t+k} - \bar{x}_{t+k})}{\sqrt{\sum_{t=1}^{n-2} (x_t - \bar{x}_t)^2 (x_{t+k} - \bar{x}_{t+k})^2}} \quad (5)$$

其中: $\bar{x}_t = \frac{1}{n-k} \sum_{t=1}^{n-k} x_t, \bar{x}_{t+k} = \frac{1}{n-k} \sum_{t=1}^{n-k} x_{t+k}$

适应性滤波可以应用于式 (3) 所示的自回归模型上, 系数 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ 可以通过非线性最小二乘法加上适应性滤波来求得。概括地说, 这种方法是从 ϕ_i 一组初始值开始, 逐次迭代, 不断调整, 以实现自回归系统的最优化。

适应性滤波在实际当中很重要的一个特点是它能把自回归方程中的系数调整成为新的所需要的值。换句话说, 自回归系数 ϕ_i 并不是固定不变的, 而是每进行一次迭代, 就要发生一些变化, 逐次向最佳估计值逼近。完整的适应性 AR 滤波模型表达式如式 (6)

$$x_t = \phi_1 x_{t-1} + \phi_2 x_{t-2} + \phi_3 x_{t-3} + \dots + \phi_p x_{t-p} \quad (6)$$

适应性滤波预测方法具有简单易行、约束条件少、自适应性、使用数据点少等优点。

3.2 支路相角差的预测

实施测量到极值以后发出重合令到断路器合闸

操作完成, 必有一段延时 Δt , 为了保证真正重合在优选时机到来前预测到它, 则合闸命令应提前 Δt 时间发出。通常 Δt 不大于 0.1 s, 本文中取 Δt 为 0.25 s。图 8 给出图 5 所示的系统的支路 YMC-FTB 两端相角差的实际值与预测值的曲线。

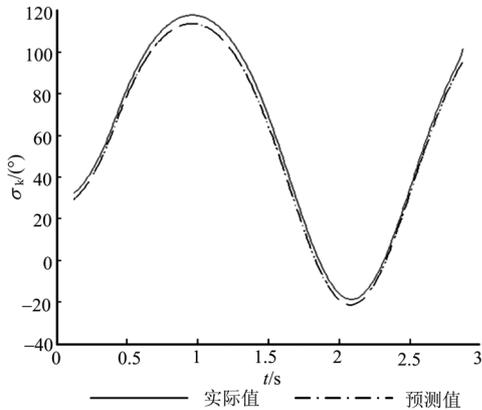


图 8 YMC-FTB 两端相角差曲线

Fig.8 Curves of phase angle of branch YMC-FTB

由图 8 可见, 应用本文所给适应性滤波的时间序列自回归模型的预测技术可以较准确地预测出支路两端相角差的变化趋势。

由表 1 所见, 支路两端相角差的实际值与预测值误差很小, 因此用此方法预测的时间重合, 对系统稳定性不会有太大的影响。对于瞬时性故障, 其优化重合条件为支路两端相角差为极小值时, 使用预测曲线, 当式 (7) 满足时:

$$\sigma_{k,p-1} > \sigma_{k,p} < \sigma_{k,p+1} \quad (7)$$

在 $\sigma_{k,p}$ 时刻发出重合指令, 经执行机构 Δt 的延时后实现优化重合。

表 1 支路两端相角差的预测值与实际值对比

Tab.1 Comparison between prediction value and real value of phase angle of branch ends

时间/s	实际值	预测值
1.5	61.709 1	60.149 9
1.6	42.163 7	40.727 9
1.7	21.522 3	20.322 8
1.8	2.133 9	2.079 3
1.9	-13.452 6	-13.890 0
2.0	-23.136 0	-23.143 9
2.1	-25.666 4	-25.290 9
2.2	-20.750 8	-20.080 5
2.3	-9.043 1	-8.221 6
2.4	7.897 5	8.721 9
2.5	27.804 3	28.480 2

4 总结

通过对重合闸最优时间的整定方法的研究表明, 抑制割集的暂态势能的变化幅度可以提高系统的暂态稳定性。以重合后包括故障线路的脆弱割集相角差最小为原则整定重合闸时间, 是以提高系统暂态稳定性为目的。仿真结果表明, 按此条件整定重合时间, 能有效地阻尼系统的摇摆, 并且该方法仅依赖于网络局部变量的动态观测信息。加入预测作用后能考虑断路器合闸的时间延迟, 保证在各种运行条件和故障条件下的优化重合。

参考文献

- [1] GE Yao-zhong, SUI Fong-hai, XIAO Yuan. Prediction method for preventing single-phase reclosing on permanent fault[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4 (1).
- [2] 张保会, 袁越. 最佳重合闸时间及其整定计算[J]. 中国电力, 1995, 28 (2): 12-16.
ZHANG Bao-hui, YUAN Yue. Optimal reclosing time and its setting calculation[J]. Electric Power, 1995, 28 (2): 12-16.
- [3] 袁宇春, 张保会. 对整定线路重合闸时间的讨论[J]. 继电器, 2000, 28 (1): 13-15.
YUAN Yu-chun, ZHANG Bao-hui. Discussions for setting reclosing time of transmission lines[J]. Relay, 2000, 28(1): 13-15.
- [4] 袁宇春, 张保会. 基于 EEAC 的重合闸最佳时刻的计算[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (17): 10-12.
YUAN Yu-chun, ZHANG Bao-hui. Calculation of the optimal reclosing time based on EEAC[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (17): 10-12.
- [5] 孙静, 李兴源, 李立. 基于小波变换和 ANN 的最佳重合闸时刻的研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (6): 6-10.
SUN Jing, LI Xing-yuan, LI Li. Study on the optimal reclosing time based on wavelet transform and artificial neural network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (6): 6-10.
- [6] 唐蕾, 陈维荣. 神经网络在电力系统自适应单相重合闸中的应用[J]. 继电器, 2003, 31(8): 26-29.
TANG Lei, CHEN Wei-rong. Neural network's application in adaptive single-phase reclosing of electric power system[J]. Relay, 2003, 31(8): 26-29.
- [7] 袁宇春, 张保会, 钱国明. 多机电力系统中重合闸最佳时刻的研究 (第1部分): 瞬时性故障最佳重合时刻的研究[J]. 电力系统自动化, 1998, 22 (4): 16-18.

(下转第 22 页 continued on page 22)

et al. An approach for electrical harmonic analysis based on Nuttall window double-spectrum-line interpolation FFT[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (25) : 153-158.

[10] 王群, 吴宁, 王兆安. 一种基于人工神经网络的谐波测量方法[J]. 电网技术, 1999, 23 (1) : 29-32.
WANG Qun, WU Ning, WANG Zhao-an. An artificial neural network approach for measuring harmonics[J]. Power System Technology, 1999, 23 (1) : 29-32.

[11] 危韧勇, 李志勇. 基于人工神经网络的电力系统谐波测量方法[J]. 电网技术, 1999, 23 (12) : 20-23.
WEI Ren-yong, LI Zhi-yong. Measurement of harmonics in power system based on artificial neural network[J]. Power System Technology, 1999, 23 (12) : 20-23.

[12] 柴旭峰, 文习山, 关根志, 等. 一种高精度的电力系统谐波分析算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9) : 67-70.
CHAI Xun-zheng, WEN Xi-shan, GUAN Gen-zhi, et al. An algorithm with high accuracy for analysis of power system harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (9) : 67-70.

[13] 曾喆昭, 文卉, 王耀南. 一种高精度的电力系统谐波智能分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (10) : 23-27.
ZENG Zhe-zhao, WEN Hui, WANG Yao-nan. An approach with high accuracy for intelligent analysis of power system harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (10) : 23-27.

[14] 向东阳, 王公宝, 马伟明, 等. 基于FFT和神经网络的非整数次谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (9) : 35-39.
XIANG Dong-yang, WANG Gong-bao, MA Wei-ming, et al. A new method for non-integer harmonics measurement based on FFT algorithm and neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (9) : 35-39.

[15] Shi Y, Eberhart R C. A modified swarm optimizer[C]// IEEE International Conference of Evolutionary Computation. Anchorage, Alaska: 1998.

[16] Eberhart R C, Shi Y. Particle swarm optimization: developments, applications, and resources[C]// Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2001: 81-86.

[17] 宁薇薇, 裴源, 刘立彦, 等. 基于傅立叶基函数神经网络算法的电力系统谐波分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 12-16.
NING Wei-wei, PEI Yuan, LIU Li-yan, et al. Inter-harmonic analysis approach in power system using neural network algorithm with Fourier basis functions[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 12-16.

收稿日期: 2010-01-22; 修回日期: 2010-04-09

作者简介:

覃思师 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量分析; E-mail: jas7442003@163.com

刘前进 (1967-), 男, 副教授, 主要研究方向为继电保护, 电能质量分析。

(上接第17页 continued from page 17)

YUAN Yu-chun, ZHANG Bao-hui, QIAN Guo-ming. Study on the optimal reclosing time in multi-machine power system. part one: study on the optimal reclosing time at instantaneous fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22 (4) : 16- 18.

[8] 袁宇春, 张保会, 阎海山. 多机电力系统中重合闸最佳时刻的研究 (第2部分): 永久性故障最佳重合时刻的研究[J]. 电力系统自动化, 1998, 22 (6): 46-48.
YUAN Yu-chun, ZHANG Bao-hui, YAN Hai-shan. Study on the optimal reclosing time in multi-machine power system, part two: study on the optimal reclosing time at permanent fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22 (6) : 46- 48.

[9] 张保会, 雷敏, 袁宇春. 优化重合闸时间提高网络传输能力[J]. 继电器, 1998, 26(1): 17-21.
ZHANG Bao-hui, LEI Min, YUAN Yu-chun. Optimizing the reclosing time to improve the transmission capacity of power network[J]. Relay, 1998, 26(1): 17-21.

[10] 蔡国伟, 穆钢, 等. 基于网络信息的暂态稳定性定量分析-支路势能法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 1-6.
CAI Guo-wei, MU Gang, et al. Branch potential energy method for power system transient stability assessment based on network dynamic variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (5) : 1- 6.

收稿日期: 2010-01-27; 修回日期: 2010-04-06

作者简介:

罗远翔 (1975-), 女, 博士研究生, 讲师, 研究方向为电力系统分析及控制。E-mail: yuanxiangluo@163.com