

电力系统低频减载研究与应用发展

陈俊山¹, 洪兰秀¹, 郑志远²

(1. 福州电业局, 福建 福州 350004; 2. 福建宏博科技有限公司, 福建 福州 350004)

摘要: 低频减载控制作为维持电力系统稳定运行的最后一道防线, 其研究对于当前复杂性不断提高的电力系统具有特别重要的意义。针对电力系统低频减载技术的特点、方案分类、应用现状、优化研究及各种先进算法在UFLS中的应用情况进行综合阐述。并特别关注了近年来发展出来的各种新理论、新技术及其在低频减载控制中的应用。简要地分析探讨了各种方案的特点和不足及其改进发展情况, 研究了元件参数模型的变化、动态变量间的相互作用对UFLS方案设计与实施所产生的影响以及协调控制技术在UFLS中的应用。

关键词: 低频减载; UFLS; 综述

Investigation and application of under-frequency loading shedding

CHEN Jun-shan¹, HONG Lan-xiu¹, DENG Zhi-yuan²

(1. Fuzhou Electric Power Bureau, Fuzhou 350004; 2. Fujian Hongbo Science and Technology, Fuzhou 350004, China)

Abstract: This paper analyzes the characteristics, scheme classification, application status, optimization of power system low frequency load shedding techniques, and various advanced algorithms applied in UFLS are summarized. It briefly analyzes the characteristics of various schemes, defects and its improvement. The component parameter model, the influence of interaction of dynamic variables on the UFLS design and implementation, application of coordination and control techniques in UFLS are also studied.

Key words: under-frequency loading shedding; UFLS; summary

中图分类号: TM762.4

文献标识码: B

文章编号: 1003-4897(2007)14-0079-04

0 引言

电力系统低频减载是指电力系统在遭受大扰动、出现大功率缺额时, 响应于系统频率而启动并切除部分负荷, 以维持系统功率平衡和防止系统频率崩溃的一种有功频率控制手段。

电力系统发、用电不平衡时, 其控制方案主要可分为两种, 即改变系统发电机出力和改变系统负荷量。就发电不足而言, 相应的控制方式为低频调速控制UFGC (Under Frequency Governor Control) 和低频减载UFLS (Under Frequency Load Shedding)。其中低频调速控制方式的有效实现受到系统中旋转备用容量及其调用速度的限制; 当旋转备用容量不足或由于发电机出力调整速度限制, 难以满足事故后系统紧急控制需求时, 启用低频减载控制、有选择地切除部分负荷成为系统稳定控制的必要和最后选择。

低频减载控制作为维持电力系统稳定运行的最后一道防线, 在世界范围内得到了广泛应用。特别地, 随着系统互联和市场化改革的发展, 电力系统

规模扩大、复杂性程度不断提高; 另一方面, 系统中旋转备用容量则相对减少。在这种条件下, 如何保持和提高系统运行的安全、稳定性, 特别是在系统遭受大功率冲击后, 如何维持系统稳定运行, 成为普遍关注的问题; 世界电力史上的一系列电网崩溃事故, 也说明了故障后对相应系统施行精确、有效的紧急控制的必要性和重要性。

1 UFLS 方案的特点及其分类

传统的低频减载控制设计通常采用对单机带集中负荷的简化系统模型进行静态分析的方法, 忽略扰动后系统内机组间振荡、节点电压变化、旋转备用容量限制和负荷模型变化以及相关设备的动态响应特性等因素的影响。在设计过程中, 往往以频率值和相应延时作为负荷切除的判断标准; 并按照最大可预见的扰动量来确定各级频率切除点对应的负荷切除量。

然而, 在实际系统运行中, 系统的拓扑及参数是实时变化的, 且因系统中各种动态元件的多样化, 这种依据等值静态模型进行离线设计的方案难以反

映实际系统的动态响应和控制需求。另外,依据最大可预见的扰动量进行设计所得到的方案在实际的运行控制中往往造成负荷过切,增加了用户停电损失。因此,这种传统设计方式在使方案设计获得了相当简易性、方便性的同时,也在很大程度上降低了方案的经济性、甚至有效性。在这种条件下,有效、合理、经济、优化以及具有自适应性能的低频减载方案的研究和应用得到了越来越深入的发展。

半个世纪以来,低频减载方案研究主要可分为静止的 UFLS 方案和动态的 UFLS 方案^[1]。其中静止的 UFLS 方案即传统的基于频率值和既定延时的设计方案,而动态的 UFLS 方案即动态地根据频率下降速率大小确定相应级减载量的自适应 UFLS 方案。综合应用以上两种设计方式进行 UFLS 方案设计,就得到了半适应 UFLS 方案设计方法^[2]。文献[3]提出在原有传统法的基础上,增加频率下降率作为判断标准及控制出口选择,以切除其对应整定的负荷的设计方案。研究表明,该方法通过增加控制出口选择,有助于加快严重过载时的负荷切除速度和提高系统稳定性及频率控制水平。

静止法是基于简化的系统模型、操作员经验以及系统仿真整定而得,在不同扰动情况下均采用相同的减载方案进行紧急控制,其结果往往造成切负荷过量或不足,其缺点显而易见。动态法则自适应地根据系统频率下降速率大小确定切负荷量,大大提高了方案的精确性、灵活性和优化性。然而,动态法在紧急事故状态下的收敛性仍有待提高。并由于前期的动态整定法仍然停留于半离线水平,限制了其方案有效性的提高。

2 UFLS 优化研究及其进展

随着计算技术的发展和运用,越来越多的高级算法被引入电力系统研究和应用领域,如利用神经网络模型、遗传算法、模糊理论等算法具有计算速度快、自学能力强的特点,进行低频减载方案设计与优化^[4, 5],以适应电网拓扑结构和参数的实时变化,实现方案的实时整定。并通过从拓扑结构上均匀分布各级减载量来减轻负荷过切现象^[6]。

此外,随着电网规模的扩大和电力市场化改革的发展,电网运行经济性以及控制优化的综合优化思想越来越深入人心,电力系统低频减载控制设计的优化研究得到了广泛关注和运用。文献[7]提出了一种基于人工神经网络模型、以切负荷量最小为目标的 UFLS 优化设计方案;文献[8]提出了一种基于成本效益分析的以旋转备用投资、运行、维护费用及 UFLS 对用户停电影响(货币化)等总费用最小为

控制目标的系统化优化方法,综合地对系统旋转备用容量及低频减载方案进行优化。文献[9]则探讨了一种采用 Bender 分解法,综合考虑旋转备用、低频减载和经济调度的序列优化算法。并有文献提出,通过充分利用系统中不同性质、类型的负荷本身的特点,提高 UFLS 方案的有效、优化性;如利用系统中对频率响应灵敏的负荷对系统频率所具有的支撑作用,尽量将频率不灵敏性负荷配置于较低减载级,而将频率灵敏性负荷配置于较高减载级^[5];还有如,对于含有抽水蓄能水电站的特殊电力系统,充分利用工作于抽水蓄能方式的机组的工作特点,在实施 UFLS 方案时,可将这些机组作为前几轮减载对象,以减轻低频减载对系统用户的影响^[7]。

3 UFLS 理论研究新发展

由于电力系统的规模及其运营、管理方式的变化发展,以及传统的低频减载控制设计方案及技术的许多不足和弊端,各种与低频减载相关的设备特性及其模型和技术等得到了越来越详细、深入的研究和发展,包括电力系统中各种动态元件与参数模型对系统控制性能的影响、不同的动态变量之间的相互影响关系以及不同控制措施与技术之间的相互协调以实现优化控制等。

3.1 不同的系统、元件模型对 UFLS 方案研究、设计与控制的影响

研究表明,采用不同的系统模型、负荷模型及其它元件参数模型^[10-12]进行电力系统分析和 UFLS 方案设计,其结果均可能存在明显差异,从而形成不同的控制性能水平。

文献[12]就不同的负荷模型对系统分析和低频减载控制设计及方案性能实现的影响进行分析,说明了各种负荷模型对控制设计及实施的影响方式与特点;并在分析的基础上,兼顾模型对系统模拟的准确性和模型实现及其参数获取的简易可行性,将由静态负荷模型和动态电机模型所复合而成的综合负荷模型作为电力系统负荷模拟的推荐模型。而文献[10]按照四种系统建模方式,建立四种系统模型;在此基础上,结合给定的 UFLS 方案进行仿真,说明了采用不同系统模型对 UFLS 研究、设计和控制所造成的影响及结果差异。该文的研究结果也从一个方面反映了不同设备、元件的动态响应特性及其模型变化对系统分析和控制的影响;进一步也说明,在电力系统 UFLS 控制研究及方案设计中,传统的采用集中参数模型的静态分析方法不足以使系统获得最佳匹配的 UFLS 方案;但通过采用更先进的模型、算法和计算工具对系统元件进行详细的模拟则

有望在相当大的程度上提高 UFLS 方案的精确性。在对系统模型进行多方面分析比较的基础上, 该文最终推荐将包含调速器和自动调压装置影响的分布系统带综合负荷的复合模型作为最适宜系统模型。另外, 文献[11]在现有的系统频率响应模型及其特性分析的基础上, 就其不足, 提出了一种包含了 UFLS 模块的综合频率响应模型 SFR-UFLS, 研究结果表明, 通过适当的算法、模型选择, 这种 SFR-UFLS 模型有助于提高系统研究和控制设计的有效性和精确性。

3.2 电力系统不同动态变量间的关系及其对 UFLS 方案设计与实施的影响

此外, 还有文献就不同动态变量之间的相互影响及其对电力系统 UFLS 方案设计与控制实现的影响进行了研究^[13, 14]。文献[13]中首先通过理论分析和案例仿真说明, 在互联电网遭受大功率扰动后的调整时间内, 电网中各节点的频率特性呈现时间和空间分布性; 并通过对单机带集中负荷与多机带分布负荷两种系统模型进行理论分析与数学推导, 得到了多种影响系统频率分布性的因素及其影响方式。这些因素具体包括: 节点频率特性对扰动点的灵敏度、系统保持电压稳定的能力(即系统的电压支撑能力)以及负荷与调速器等环节的有功频率特性等。由于 UFLS 装置是响应于其本身所配置节点的频率特性而启动并进行控制, 故而不难理解, 装置的控制效果必然受到系统频率空间分布性的影响, 并从这个角度提出了一种改善 UFLS 方案设计和提高其控制性能的思路。而文献[14]则就电网电压稳定性水平与系统频率之间的相互影响关系进行探讨分析。文中通过比较某电网在既定事故后的电压、频率、 V/f 等实际故障记录曲线和相应故障模拟的系统仿真结果, 说明了当系统发电-负荷不平衡度达到一定水平(如 30%)时, 扰动后系统电压会明显下降, 最大时可能低于 0.8 pu。在此情况下, 传统的假定系统电压在整个调整过程中近似保持恒定的条件已不复成立。当电压明显降低时, 发电机过励磁启动, 提高系统电压; 这时, 若低频减载启动并切除负荷使得系统频率上升, 由于电压也同步上升, 电网消耗的功率增加, 进而使频率上升速率降低(低于电压恒定假设前提下的理论或仿真计算值)。换句话说, 由于系统的有功-频率特性与无功-电压特性之间的不完全解耦关系及其相互影响; 在实际系统控制中, 特别是当发电-负荷不平衡度升高时, 可能出现电压升高至超过额定值, 而频率仍有明显下降, 甚至于远低于额定水平的现象。因此, 在精确、完整的系统设计中, 特别是在以提高系统

控制优化性能为目标的情况下, 必须认真考虑电压变化对系统负荷、频率及系统控制性能水平可能存在的影响。

3.3 协调控制在 UFLS 中的应用研究

由于系统控制理论与技术及其它相关技术在电力系统中的应用发展, 不同的控制技术和措施之间的相互配合以及协调控制的研究也得到人们的极大关注。

文献[15]对国际上多起大频率扰动事故及其成因进行分析, 总结了常规 UFLS 方案的不足, 并突出了方案精确性与快速性要求对系统扰动后稳定控制的重要性程度。在此基础上, 提出了一种基于 WAMS(Wide Area Measurement Systems)系统的 UFLS 设计方案。研究表明, 该方案有利于充分利用运行系统的各类实时动态信息, 方便实现系统状态的及时辨识, 以进行必要控制; 并有助于确定合理的负荷切除总量及其分布配置。

文献[16, 17]则提出通过实现 UFGC 与 UFLS 的协调控制的方法来提高电力系统遭受功率大扰动后的稳定控制水平和性能, 不同的是两者所采用的协调控制方式。其中, 文献[16]是采用分布式超导磁储能系统 D-SMES(即 Distributed Superconducting Magnetic Energy Storage Devices), 利用其具有快速输出和吸收有功、无功功率的功能来实现协调控制。研究表明, 通过利用 D-SMES 能在瞬间快速提供有功、无功功率支持的特性, 能够有效减小扰动后的短时频率下降速率及幅度, 为系统备用容量的调用和充分利用获得了响应时间; 因此有助于提高系统供电可靠性和运行安全稳定性。而文[17]则提出通过切换发电机工作方式的方法实现 UFGC 与 UFLS 的协调控制, 具体做法是: 当系统受大功率冲击而使频率明显降低(即过载低频)时, 快速将工作于经济调度模式的发电机切换至局部控制模式, 以便发电机响应于其所在节点的频率变化情况而改变出力, 维持系统频率稳定; 待系统频率恢复时, 重新将相应发电机恢复为 AGC 经济调度模式。特别地, 文献[17]还提出了一种有条件地提高未减载继电器的减切频率整定值的方法, 以实现多重过负荷的控制。

4 结束语

总而言之, 随着互联电网的日益壮大和复杂化, 以及社会经济发展对电能质量要求的不断提高, 必然要求电力系统运行控制性能相应提高。低频减载作为维持电力系统稳定运行的最后一道防线, 如何有效地提高系统在遭受大功率冲击后的稳定控制水

平是非常关键的。就目前状况而言,低频减载技术在理论研究方面已得到极大发展;特别是,各种新技术在低频减载中的应用研究也得到了人们的极大关注。但另一方面,低频减载实用技术的发展又相对缓慢,各种新技术、新方案对于实际运行系统控制的有效性和可行性还有待于深入分析。在实际系统应用中,鉴于电力系统的庞杂性,如何利用各种优越的理论和进行合理的系统控制设计,才能更好地发挥其在电力系统低频减载应用中的优势,仍需作进一步研究与验证,以实现 UFLS 实用技术的长足发展。

参考文献

- [1] Mohd Zin A A, Mohd Hafiz H, Wong W K. Static and Dynamic Under-frequency Load Shedding: A Comparison[A]. In: International Conference on Power System Technology Powercon[C]. Singapore. 2004.
- [2] Delfino B, Massucco S, Morini A, et al. Implementation and Comparison of Different Under Frequency Load-shedding Schemes[A]. In: Proc IEEE Power Engineering Society Summer Meeting[C]. 2001. 307-312.
- [3] Grewal G S, Konowalec J W, Hakim M. Optimization of a Load Shedding Scheme[J]. Industry Applications Magazine, 1998, 4(4): 25-30.
- [4] Mitchell M A, Pecos Lopes J A, Fidalgo J N, et al. Using a Neural Network to Predict the Dynamic Frequency Response of a Power System to an Under-frequency Load Shedding Scenario[A]. In: Power Engineering Society Summer Meeting[C]. 2000.
- [5] Pecos Lopes J A, Wa W C, Proenca L M. Genetic Algorithms in the Definition of Optimal Load Shedding Strategies[A]. In: PowerTech Budapest 99. International Conference on Electric Power Engineering[C]. 1999.
- [6] Mohd Zin A A, Hafiz H M, Aziz M S. A Review of Under-frequency Load Shedding Scheme on TNB System[A]. In: National Power & Energy Conference (PECon) 2004 Proceedings[C]. Malaysia: 2004.
- [7] Hsu C T, Kang M S, Chen C S. Design of Adaptive Load Shedding by Artificial Neural Networks[J]. IEE Proc Gener Transm and Distrib, 2005, 152(3).
- [8] Cheng C P, Chen S. Under-frequency Load Shedding Scheme Design Based on Cost-benefit Analysis[A]. In: Proceedings of the 6th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOXL[C]. Hong Kong: 2003.
- [9] Moya O E. A Spinning Reserve, Load Shedding, and Economic Dispatch Solution by Bender's Decomposition[A]. IEEE Trans on Power Systems, 2005.
- [10] Dadashzadeh M R, Sanaye-Pasand M. Simulation and Investigation of Load Shedding Algorithms for a Real Network Using Dynamic Modeling[A]. In 39th International Universities Power Engineering Conference, UPEC 2004-Conference Proceedings[C]. 2005. 1111-1115.
- [11] Aik D L H. A General-Order System Frequency Response Model Incorporating Load Shedding Analytic Modeling and Applications[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 12(2).
- [12] Lu Y, Kao Wen-Shiow, Chen Yung-Tien. Study of Applying Load Shedding Scheme with Dynamic D-factor Values of Various Dynamic Load Models to Taiwan Power System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005.
- [13] Min Yong, Hong Shao-bin, Han Ying-duo, et al. Analysis of Power-frequency Dynamics and Designation of Under Frequency Load Shedding Scheme in Large Scale Multi-machine Power Systems[A]. In: IEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management[C]. Hong Kong: 1991.
- [14] Imai S, Yasuda T. UFLS Program to Ensure Stable Island Operation[A]. In: Power Systems Conference and Exposition, IEEE PES[C]. 2004.
- [15] SHI Bo-nian, XIE Xiao-rong, HAN Ying-duo. WAMS-based Load Shedding for Systems Suffering Power Deficit[A]. In: 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition[C]. Dalian(China): 2005.
- [16] ZHANG Li, LIU Yi-lu, Crow M L. Coordination of UFLS and UFGC by application of D-SMES[A]. In: Power Engineering Society General Meeting[C]. 2005. 1064 - 1070.
- [17] Chuvychin V N, Gurov N S, Venkata S S, et al. An Adaptive Approach to Load Shedding and Spinning Reserve Control During Under-frequency Conditions[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4).
- [18] Jovanovic S. Self-tuning Steam Turbine Controller in a Multi-machine Power System[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1995, 14(4).
- [19] Shokooh F, Dai J J, Shokooh S, et al. An Intelligent Load Shedding (ILS) System Application in a Large Industrial Facility[A]. In: Industry Applications Conference, Fourtieth IAS Annual Meeting[C]. 2005.
- [20] Perumal N, Amran A C. Automatic Load Shedding in Power System[A]. In: National Power and Energy Conference (PECon) Proceedings[C]. Malaysia: 2003.
- [21] Au Yiu-Wing, Yung Kai-Man. Emergency Control and Restoration of Power System Under Disturbance[A]. In: China Light and Power Company, Limited Hong Kong, Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-97[C]. Hong Kong: 1997.
- [22] Sanaye-Pasand M, Dadashzadeh M R. Iran National Grid Blackout, Power System Protection Point of View[A]. In: Eighth IEE International Conference on[C]. 2004.

收稿日期: 2007-01-15

作者简介:

陈俊山(1971-),男,工程师,从事过变电检修、生产计划、工程管理、营销服务等工作;

洪兰芳(1981-),女,硕士,从事电网规划设计工作。

E-mail: xiu-hl@163.com