

基于 UPFC 的供电能力提升技术及其在江苏电网中的应用

刘建坤, 李 群, 陈 静

(江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘 要:潮流分布不均是制约电网供电能力提升的重要因素, 本文研究了统一潮流控制器 (UPFC) 提升电网供电能力的新技术, 并在机电暂态仿真程序 PSASP 中自定义建模。仿真中首先设置安装点目标功率值, 再根据潮流计算结果反推 UPFC 控制参数, 实现了含 UPFC 的实际大电网潮流调控分析。通过 UPFC 的潮流控制均衡变电站负载、降低故障情况下的线路过载倍数, 提升了电网分区的供电能力和安全稳定性。江苏电网 2014 年规划数据验证了所提方案的有效性。

关键词: 供电能力; 统一潮流控制器; PSASP; 江苏电网

0 引言

随着电网负荷的不断增长, 区域内发电和负荷分布不均衡的问题日益凸显, 变压器和输电线路输送功率不均的普遍存在, 重载设备和轻载设备并存的情况屡见不鲜, 受制于部分重载设备的输电瓶颈, 电网供电能力难以充分利用; 此外, 由于输电通道资源的日趋稀缺等因素, 电网建设难度日益增大。因此, 充分发挥现有电网的输电能力, 提高电网潮流控制能力, 对提高电网的供电能力和安全稳定性有着重要的意义。

作为最具创造性、功能最强大^[1]的 FACTS 装置, 统一潮流控制器 UPFC^[2] (Unified Power Flow Controller) 自 1992 年提出以来即获得了国内外专家学者的广泛关注。通过控制线路阻抗、电压或功角, UPFC 可以在大范围内快速、连续地调节输电线路的有功和无功潮流, 为提升电网的供电能力提供了新的思路。IEEE 节点系统的优化结果表明, UPFC 对系统局部潮流的调节效果显著^[3], 但控制运行点^[4]和反馈信号的选取^[5]对控制效果的影响较大。在故障情况下, 按功率注入模型^[6]确定 UPFC 的运行约束条件可以快速改善系统的电压和潮流^[7]; 文献[8]提出了 UPFC 的模糊 PI 自整定控制策略, 并在 PSCAD 程序中建立了仿真模型, 但由于仿真规模的限制, 无法在实际电网中直接应用; 文献[9]运用非线性鲁棒控制理论建立了考虑外部干扰的 UPFC 动态模型, 结合混成反馈控制策略改善四川电网的暂态稳定性。在非故障情况下, 可将多变量

采样调节器的设计理念引入 UPFC, 即通过现场试验获得最优安装位置和单位开环阶跃响应^[10]。目前, UPFC 的研究大多致力于控制器的设计和控制算法的改进^[11-13], 在实际电网中的应用则鲜少见诸报道。

本文依据江苏电网 2014 年规划数据, 选择 UPFC 最优安装点, 并基于功率注入法在机电暂态仿真程序 PSASP 中建立了 UPFC 自定义模型, 通过平衡潮流分布提高电网的供电能力。

1 UPFC 自定义建模

1.1 UPFC 的基本原理

UPFC 由 2 个可以投切转换的换流器组成, 相当于并联的静止无功发生器 (STATCOM) 与串联的静止同步串联补偿器 (SSSC) 的组合, 原理结构如图 1 所示。

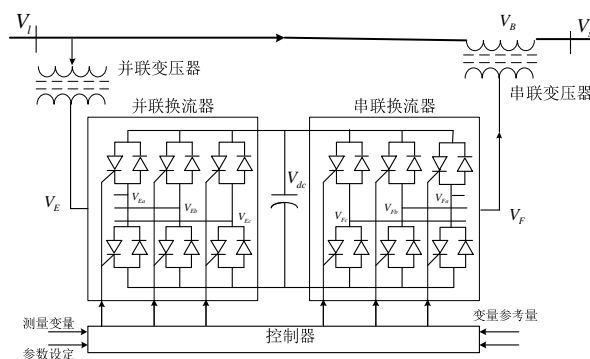


图 1 统一潮流控制器结构原理图

其中, 并联换流器在公用直流联结处提供或吸收串联换流器所需要的有功能量, 经换流后到交流

端送入与输电线路并联的变压器。因此,在稳态时若不考虑自身损耗,UPFC 两侧的有功功率相等,直流电容器既不发出也不吸收有功功率,电压 V_{dc} 保持恒定。串联换流器可控制 V_B 在 0 和最大值 V_{Bmax} 之间,同时使相角 φ_B 保持在 0 和 360° 之间,并通过串联变压器将电压 V_B 叠加到线路电压上。通过控制 V_B 的幅值和相角,UPFC 就可实现传统电力传输中的串联补偿和移相等功能^[14]。

1.2 UPFC 的计算模型

设在输电线路 $l-m$ 中近 l 侧安装了 UPFC,则输电线路等值电路如图 2 所示。

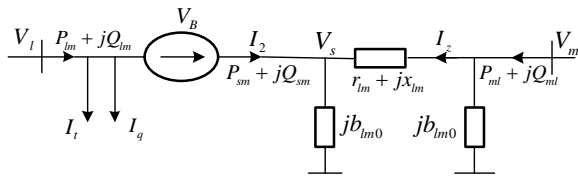


图 2 含 UPFC 的输电线等值电路

设 UPFC 将 $l-m$ 线路输送功率控制为:

$$P_{ml} + jQ_{ml} = P_c + jQ_c \quad (1)$$

式中, P_c 和 Q_c 为给定的目标功率值。考虑到线路的阻抗损耗, P_{sm} 和 Q_{sm} 可分别表示为:

$$\begin{aligned} P_{sm} &= -(P_c - \frac{P_c^2 + Q_c^2}{V_m^2} + b_{lm0}^2 V_m^2 + 2b_{lm0} Q_c) r_{lm} - P_c \\ &= (\frac{P_c^2 + Q_c^2}{V_m^2} + b_{lm0}^2 V_m^2 + 2b_{lm0} Q_c) r_{lm} - P_c \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Q_{sm} &= -(Q_c - \frac{P_c^2 + Q_c^2}{V_m^2} + b_{lm0}^2 V_m^2 + b_{lm0} V_s^2) x_{lm} - b_{lm0} (V_m^2 + V_s^2) - Q_c \\ &= (\frac{P_c^2 + Q_c^2}{V_m^2} + b_{lm0}^2 V_m^2 + 2b_{lm0} Q_c) x_{lm} - b_{lm0} (V_m^2 + V_s^2) - Q_c \end{aligned} \quad (3)$$

忽略 UPFC 的有功损耗, 则:

$$\begin{cases} P_{lm} = P_{sm} \\ Q_{lm} = -I_q V_l + \text{Im}(V_l I_2^*) \end{cases} \quad (4)$$

考虑到 UPFC 可同时控制 l 侧电压, 在潮流计算中, 可将 l 侧母线设置为 PV 节点, 则 Q_{lm} 不再参与潮流计算的迭代过程。

1.3 UPFC 的 PSASP 建模

基于功率注入法, 利用机电暂态仿真 PSASP 程序的自定义建模功能, 根据式 (2) ~ (4) 建立了 UPFC 的潮流计算模型。传统模型在计算电网潮流前需首先整定 UPFC 的控制变量, 然而实际电网动

辄上万阶, 整定过程十分复杂费时。为提高控制的效率, 本文所建模型首先设置给定线路的目标功率值, 再根据潮流计算的结果反推 UPFC 控制参数, 实用性更高。UPFC 的自定义潮流计算模型如图 3 所示。

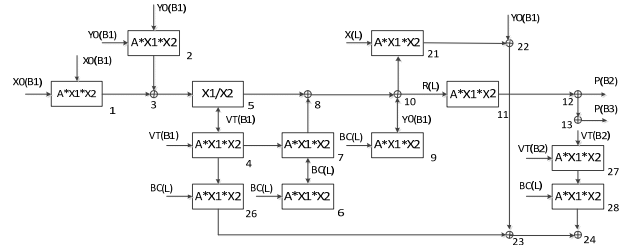


图 3 PSASP 程序中的 UPFC 自定义模型框图

图 3 中, $X0(B1)$ 、 $Y0(B1)$ 分别代表 UPFC 安装线路的目标有功和无功, 对应于式 (1) ~ (3) 中的 P_c 和 Q_c ; $P(B2)$ 、 $Q(B2)$ 、 $P(B3)$ 代表 UPFC 两侧的注入功率, 分别对应于式 (2) ~ (4) 中 P_{sm} 、 Q_{sm} 和 P_{lm} 。潮流计算迭代过程中, 自定义模型分别从 PSASP 中获取 V_m 、 V_s 等, 计算得 P_{sm} 、 Q_{sm} 和 P_{lm} 后输出到 PSASP 程序中, 然后进行下一步迭代计算 V_m 、 V_s 等, 直至最终收敛。最后, 根据潮流计算结果反推出 UPFC 的控制参数^[15], 具体推导过程如下:

$$P_f + jQ_f = V_m^2 \left(\frac{V_m^2 - V_l^2}{r_{lm} + jx_{lm}} + jb_{lm0} V_m^2 \right)^* \quad (5)$$

$$P_e + jQ_e = (P_c - P_f) + j(Q_c - Q_f) \quad (6)$$

则 UPFC 的控制参数为:

$$\begin{cases} V_B = \sqrt{(P_e^2 + Q_e^2)(r_{lm}^2 + x_{lm}^2)} / V_m \\ \varphi_B = \arctg\left(\frac{Q_e}{-P_e}\right) - \arctg\left(\frac{x_{lm}}{r_{lm}}\right) + \theta_m \\ I_q = (\text{Im}(V_l I_2^*) - Q_{lm}) / V_l \end{cases} \quad (7)$$

2 江苏电网供电能力提升技术方案

受负荷分布等因素影响, 在江苏电网同一 220kV 分区内, 500kV 变电站降压功率不均衡。当分区负荷增长时, 部分变电站降压功率到达稳定限额, 而其余变电站降压功率仍有较大的提升空间, 造成供电能力无法充分发挥。以斗陆分区为例, 斗山变稳定限额 120 万千瓦, 陆桥变稳定限额 160 万千瓦, 理论最大受电能力为 280 万千瓦, 但当陆桥变降压功率为 90 万千瓦左右时, 斗山变降压功率已达稳定限额 120 万千瓦, 受制于斗山变, 分区最

大受电能力仅为 210 万千瓦。根据 2013 年年度运行方式,江苏电网各分区的供电能力受限典型情况列于表 1。

表 1 江苏电网分区供电能力受限情况(单位:万千瓦)

分区	供电能力		受限功率	
	理论值	实际值	绝对值	百分比/%
泰通分区	640	525	115	17.97
扬州分区	245	170	75	30.61
斗陆分区	280	210	70	25
吴江分区	385	325	60	15.58
邗上分区	395	340	55	13.92
江北分区	345	295	50	14.49
东龙分区	355	310	45	12.68
苏州西分区	250	210	40	16

除供电能力受限之外,220kV 分区内线路输送功率不均造成局部电网薄弱的现象普遍存在,局部地区少量重载线路的存在限制了电网整体静态安全稳定水平。以 2012 年迎峰度夏最高负荷时刻为例,经统计仅有约 1% 的线路负载率超过 75%,约有 7% 的线路负载率超过 50%,但受制于少量的重载线路,考虑 N-1 等因素,部分地区的供电能力仍受到较大的限制,由于缺乏潮流优化控制手段,电网供电能力无法充分发挥。

考虑到江苏电网的实际情况,可选择在 220kV 分区电网内进行 UPFC 装置优化选点,均衡 500kV 变电站输送功率,优化 220kV 分区电网潮流,从而提高分区电网供电能力,在理想情况下提升分区电网供电能力的示意如图 4。

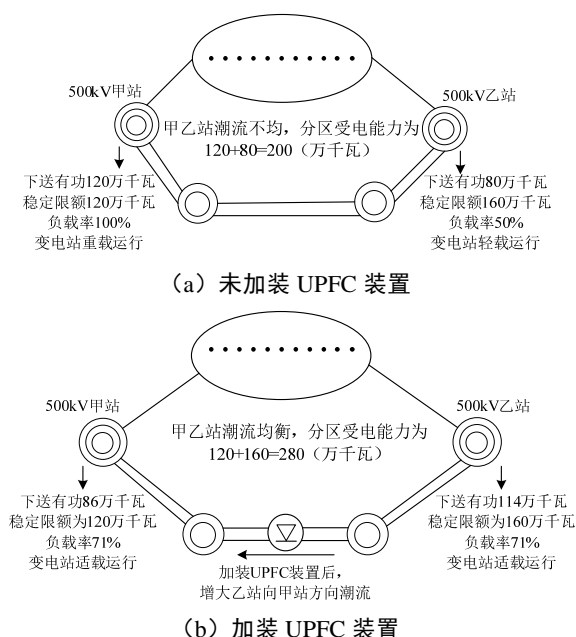


图 4 加装 UPFC 装置对分区供电能力影响的示例图

从图 4 可看出,加装 UPFC 装置后,可动态改变 220kV 线路潮流,均衡 500kV 变电站下送功率,避免出现重载和轻载并存的局面。不难想到,在适当线路上加装 UPFC 亦可均衡 220kV 线路潮流,大幅提高分区供电能力。

3 算例仿真

为验证本文所提供供电能力提升方案的正确性,采用 UPFC 的自定义建模,在 PSASP 中计算分析 UPFC 安装前后对江苏电网典型分区供电能力的影响,算例系统采用江苏电网 2014 年规划数据。根据上节所述,斗陆分区内包含斗山和陆桥 2 座 500kV 变电站,2014 年正常方式下斗陆分区虽然不存在设备过载情况,但斗山站越限率较高,使得分区供电能力受限。另一方面,斗陆分区为电磁环网,在斗山-陆桥 500kV 双线故障情况下,将造成 220kV 线路过载,影响电网安全运行。

经网架结构拓扑分析,选择斗山-长新单线加装 UPFC,同时配套建设芙蓉-季庄第二回线路以优化 UPFC 的控制效果。装设方案如图 5 所示。

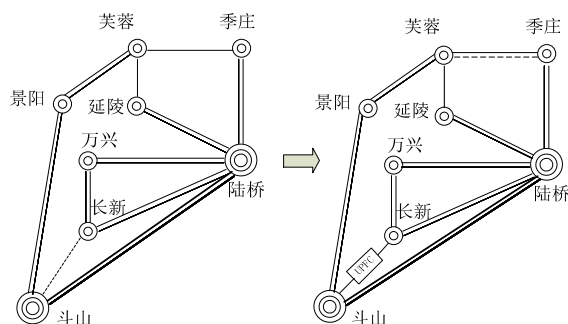


图 5 斗陆分区 UPFC 装设方案

3.1 斗陆分区供电能力分析

2014 年夏季高峰负荷时,斗山变下送功率 111.8 万千瓦,陆桥变下送功率 86.3 万千瓦,正常运行时没有出现变压器和支路过载情况。安装 UPFC 前,当该分区负荷进一步增长至约 320 万千瓦时,斗山变下送功率接近 120 万千瓦,达到稳定限值,由此可见,斗陆分区最大供电能力约 320 万千瓦。

斗山-长新单线上加装 UPFC 后,设置分区负荷成比例增长,并调节 UPFC 传输有功功率的大小,在保证线路、主变及 UPFC 不超稳定限额的情况下,计算表明,当分区总负荷为 347.5 万千瓦时,仍可控制斗山主变下送潮流小于稳定限额 120 万千瓦,

力以内;滨南-双闸双回线中任一线 N-1 时,剩余单回线的单台 UPFC 作用可以消除本身所在回线的过载;而当龙王-经港双回 N-2 故障时,滨南-双闸的两台 UPFC 可以控制近区滨南-秦淮、莫愁-双闸线的潮流在稳定极限内。UPFC 的调节作用使得分区静态安全性增强,避免了采取限电等措施防止线路过载,从而提高了分区供电能力。

综上所述,结合江苏电网的实际潮流分布情况,选取适当输电线路安装 UPFC 可以充分发挥已有网架结构的供电潜能,可通过优化潮流提高现有电网供电能力,并可以在故障情况下限制线路过载情况,提高电网的安全稳定性。

4 结论

本文基于功率注入法在 PSASP 程序中建立了 UPFC 自定义模型,实现了含 UPFC 的电网潮流计算,提出了 UPFC 提升电网供电能力的方案,并利用江苏电网实际规划数据进行了仿真验证。得到的主要结论有如下几点:

(1) 含 UPFC 的实际大电网计算分析时,在潮流计算前给定 UPFC 安装点的目标功率值,再根据潮流计算的结果反推 UPFC 控制参数可以提高计算效率,增强实用性。

(2) 潮流分布不均均是制约电网供电能力的重要因素,根据网架结构拓扑分析选择 UPFC 安装点,可以有效提升分区的整体运行水平。

(3) 对于电网负荷较重、输电走廊紧张的地区,开展 UPFC 试点工作对于电网的规划运行具有重要的示范意义。

参考文献:

- [1] 颜伟,朱继忠,孙洪波,等. UPFC 的潮流控制与暂态稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (12): 57-61.
- [2] L.Gyugyi. Unified power flow control concept for flexible AC transmission system[J]. IEE Proceedings C, 1992, 139(4): 323-331.
- [3] 刘前进,孙元章,黎雄,等. UPFC 潮流控制与优化的研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (18): 23-28.
- [4] 杜文娟,王海风, M Jazaeri, 等. UPFC 运行点变化对电力系统稳定和控制性能的影响[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (20): 40-48.
- [5] 黄方能,黄成军,陈陈,等. UPFC 稳定控制器的研究及

应用[J]. 电力自动化设备, 2009, 29 (3): 101-107.

- [6] 刘前进,孙元章,黎雄,等. 基于功率注入法的 UPFC 潮流控制研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41 (3): 55-58.
- [7] 唐爱红,朱鹏程,程时杰,等. UPFC 装置参数设计研究[J]. 高电压技术, 2005, 31 (6): 63-68.
- [8] 马凡. 统一潮流控制器动态特性及相关控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [9] 孙琳,谢桦,梅生伟,等. UPFC 混成控制器设计及其对四川电网稳定性的改善[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(1): 57-64.
- [10] 王海风,李帆,房大中. 基于电力系统非参数化模型设计统一潮流控制器[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 62-67.
- [11] 刘黎明,康勇,陈坚,等. UPFC 的交叉耦合控制及潮流调节能力分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (10): 42-50.
- [12] 江全元,邹振宇,曹一家. 基于免疫遗传算法的多机电力系统 UPFC 控制器[J]. 电工技术学报, 2006, 21 (7): 60-71.
- [13] YUAN Zhi-chang, SONG Qiang, LIU Wen-hua, et al. A nonlinear controller for Unified Power Flow Controller[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (19): 36-41.
- [14] 李骈文. 美国 INEZ 变电站统一潮流控制器简介[J]. 电网技术, 2002, 26 (8): 84-87.
- [15] 王锡凡,方万良,杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

作者简介:

刘建坤(1980-),男,高级工程师,主要从事电力系统计算与分析。