第 41 卷 第 13 期 2017 年 7 月 10 日
DOI：10.7500/AEPS20161019006
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol.41 No.13 July 10，2017

统一潮流控制器选址定容的关键影响因素分析及优化方法

宋鹏程[1]，徐　政[1]，窦　飞[2]，蔡　晖[3]
（1. 浙江大学电气工程学院，浙江省杭州市 310027；2. 国网江苏省电力公司，江苏省南京市 210024；
3. 国网江苏省电力公司经济技术研究院，江苏省南京市 210008）

摘要：针对利用统一潮流控制器（UPFC）的潮流控制能力来改善输电断面潮流分布、解决关键输电线路过载问题的应用场景，基于电网络理论推导了 UPFC 串联侧装置所需安装容量与关键输电线路潮流转移需求、UPFC 安装位置、网架结构参数之间的关系，提出了 UPFC 串联侧装置安装容量的计算方法。在此基础上，分析了影响 UPFC 装置安装容量的主要因素，并针对两种典型的网架结构，研究了转移单位潮流所需的 UPFC 串联侧装置安装容量受 UPFC 安装位置、网架结构参数的影响情况。进一步，提出了一套简单实用的 UPFC 安装位置和容量的优化方法。案例分析结果验证了所提出的 UPFC 串联侧装置安装容量计算方法和关键影响因素分析的有效性，同时验证了所提出的 UPFC 安装位置和容量优化方法的可行性。

关键词：统一潮流控制器；容量需求；影响因素分析；优化方法

0　引言

在大规模电力系统中，电力运行和调度机构通常以输电断面作为实际系统分析与监控的对象，以实现对大规模电力系统的降维控制[1-3]。输电断面集中体现了电网的薄弱环节，威胁电网的安全稳定运行。由于输电断面潮流分布不均匀导致的输电线路过载严重制约了断面的输电能力，进而威胁电网的安全稳定运行。因此，改善输电断面潮流分布，解决断面关键线路的过载问题对电网的安全稳定运行有重要意义。

统一潮流控制器（unified power flow controller，UPFC）作为最新一代的柔性交流输电系统（flexible AC transmission system，FACTS）装置，具有强大的潮流控制能力，能够实现潮流的快速、精确控制，为解决上述问题提供了一种有力的技术手段[4-6]。南京西环网 UPFC 示范工程投运后，南京西环网供电断面潮流分布的改善、输电能力的提升情况反映出利用 UPFC 装置解决上述问题具有广阔的应用前景[7-8]。

应用 UPFC 改善输电断面潮流分布，解决断面关键线路的过载问题的实质是利用 UPFC 的潮流控制能力，使潮流从重载线路向该输电线路所在的割集断面上的轻载线路转移，从而减轻过载线路的潮流。如何选择 UPFC 的最佳安装位置和容量以最大的“杠杆效应”转移重载线路的潮流是应用 UPFC 装置解决上述问题时首先需要考虑的。对上述问题的研究可以通过以下 3 个层面展开。

1）定量地研究 UPFC 的“杠杆效应”，即研究 UPFC 装置容量与 UPFC 能够实现的潮流转移量之间的关系。由于选址研究的需要，研究“杠杆效应”时应考虑到网架结构参数、安装位置等因素。

2）找出影响 UPFC 的“杠杆效应”的主要因素并分析其影响情况。

3）研究优化 UPFC 安装位置和安装容量的方法。

已有研究大多从第 3 个层面直接开展，第 1 和第 2 个层面鲜有涉及。文献[9-11]通过最优算法使电网潮流分布或断面输电能力达到最优，从而确定 UPFC 的安装位置和容量。文献[12-13]通过灵敏度指标寻找 UPFC 的最佳安装位置，再利用最优算法获得安装容量。上述最优算法在工程仿真计算软件中集成的难度较大，工程上在确定 UPFC 安装容量时可以通过考察不同容量的 UPFC 装置对电网潮流的改变能力并找到能够实现潮流控制目标的最小 UPFC 安装容量[14]，过程相对盲目且繁琐。

本文按照所述问题的 3 个层面依次展开，全面地研究了利用 UPFC 改善输电断面潮流分布、解决关键输电线路过载问题的场景下，UPFC 选址定容的相关问题；并基于 IEEE 39 节点系统验证所得结

收稿日期：2016-10-19；修回日期：2017-02-06。
上网日期：2017-04-21。

论的有效性和所提出的优化方法的可行性。

1　UPFC 模型

UPFC 由两个背靠背的电压源换流器构成，其基本结构如图 1 所示。换流器 1 经并联变压器与输电线路并联连接，主要作用是维持直流母线电压恒定。换流器 2 经串联变压器串联接入输电线路，通过控制注入电压的幅值和相角实现输电线路潮流的快速、精确控制[5]。

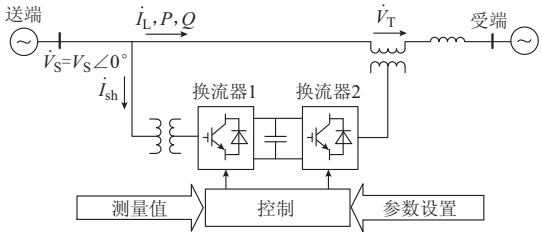

图 1　UPFC 装置基本结构
Fig.1　Basic structure of UPFC

$\dot{I}_{sh}$ 和 $\dot{I}_L$ 分别表示流入并联变压器和输电线路的电流相量的标幺值；$\dot{V}_S$ 表示送端电压相量的标幺值；$\dot{V}_T$ 表示换流器 2 通过串联变压器向系统注入的电压相量的标幺值。实际系统中，$\dot{I}_{sh}$ 远小于 $\dot{I}_L$[15]，为简化推导，在下文的讨论中忽略 $\dot{I}_{sh}$。另外，假设送端系统为恒定电压源，$\dot{V}_S$ 的幅值 V_S 不变，相角为 0°，则输电线路上的有功潮流 P、无功潮流 Q 可以表示为：

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = V_S \begin{bmatrix} I_{Lx} \\ -I_{Ly} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：I_{Lx} 和 I_{Ly} 分别为 $\dot{I}_L$ 的实部和虚部。

在实际电力系统运行过程中，UPFC 安装线路上的无功潮流通常被控制在一个比较低的水平，因此 UPFC 的无功潮流控制能力在解决输电线路过载问题上的作用很小。实际工程中在利用 UPFC 解决线路过载问题时的做法是：通过改变 UPFC 有功潮流设定值将过载线路上的有功潮流向输电断面上的轻载线路转移，而 UPFC 无功潮流设定值为 0 或者通过有功潮流设定值与设定的线路功率因数计算得出[8]。因此，本文仅考虑利用 UPFC 的有功潮流控制能力来解决线路过载问题。

另外，在利用 UPFC 改善输电断面潮流分布、解决关键输电线路过载问题的场景中，并联侧换流器的容量选取只需考虑其维持直流母线电压恒定的基本功能，其无功支撑能力可以不做考虑。

2　UPFC 装置容量需求分析

所研究的系统含有 $a-1$ 条母线和 $b-1$ 条输电线路，如图 2 所示。母线和支路编号规则如下：UPFC 安装在母线 1 和 2 之间，母线 2 是为方便推导而在 UPFC 安装线路上增加的辅助母线，如图 2 所示；将母线 1 和 2 之间的支路编号为 1，支路 1 中流过的电流相量 $\dot{I}_L$、有功潮流 P 和无功潮流 Q 如图 1 所示；其余母线编号为 3 到 a，支路编号为 2 到 b；对于连接于母线 m 和母线 n 之间的输电线路 k，线路电流相量的标幺值为 $\dot{I}_k$，线路电抗的标幺值为 X_k（$k=2,3,\cdots,b$；$m,n\in\{1,2,\cdots,a\}$）。

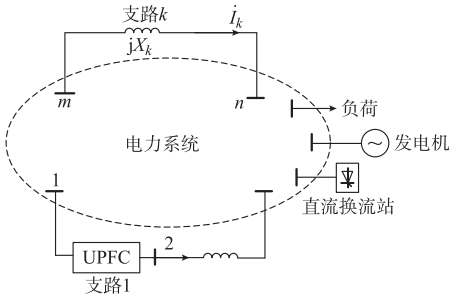

图 2　系统结构图
Fig.2　System configuration diagram

为推导 UPFC 装置所需安装容量与目标线路潮流转移量、UPFC 安装位置、网架结构参数等因素之间的关系，做出以下假设。

1）实际输电线路的电抗远大于电阻值，因此在推导时忽略了输电线路电阻的影响。

2）由于 UPFC 有功功率设定值的变化对电网中输电线路中潮流的影响较大而对系统中的负荷、发电机、直流换流站等功率元件输出电流的影响较小。根据替代定理，将 UPFC 安装支路等效为电流源 $\dot{I}_L$，同时将电网中功率装置用与电流源 $\dot{I}_L$ 独立的电流源替代。

3）当 UPFC 安装支路和电网中的功率装置等效为电流源后，便可以在所研究的系统中应用叠加定理[16]。

在所研究系统的拓扑图中，含电流源的支路开路，并选取大地为参考节点，其支路导纳矩阵 $\boldsymbol{Y}_b$ 为：

$$\boldsymbol{Y}_b = \mathrm{diag}[Y_{b1} \quad Y_{b2} \quad \cdots \quad Y_{bb}] \tag{2}$$

其中

$$Y_{bk} = \begin{cases} 0 & k=1 \\ -\mathrm{j}\dfrac{1}{X_k} & k=2,3,\cdots,b \end{cases} \tag{3}$$

矩阵 $\boldsymbol{A}$ 为所研究系统的关联矩阵，则系统的节点导纳矩阵 $\boldsymbol{Y}_n$ 可以表示为：

$$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{n}}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{Y}_{\mathrm{b}}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

矩阵 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{n}}$ 为节点导纳矩阵 $\boldsymbol{Y}_{\mathrm{n}}$ 的逆矩阵，其第 i 行第 j 列元素为 $Z_{ij}(i,j=1,2,\cdots,a)$。矩阵 $\boldsymbol{E}_k=[E_{k1},E_{k2},\cdots,E_{kb}](k=1,2,\cdots,b)$ 定义如下：

$$E_{ki}=\begin{cases}1 & i=k\\ 0 & i=1,2,\cdots,b;i\neq k\end{cases} \tag{5}$$

假设输电线路 $k(k=2,3,\cdots,b)$ 为制约其所在输电断面输送能力的关键线路，$\dot{I}_k$ 与 $\dot{I}_{\mathrm{L}}$ 的关系可以通过叠加定理得出：

$$\dot{I}_k=H_k\dot{I}_{\mathrm{L}}+\dot{I}_{\mathrm{p}k} \tag{6}$$

式中：$\dot{I}_{\mathrm{p}k}$ 为 UPFC 所在支路开路时电网中其他功率元件在输电线路 k 上产生的电流相量；H_k 为 $\dot{I}_k$ 与 $\dot{I}_{\mathrm{L}}$ 之间的传输系数，可以通过式(7)计算[17-18]。$H_k\dot{I}_L$ 反映了 UPFC 安装支路上的电流源 $\dot{I}_{\mathrm{L}}$ 单独作用下，输电线路 k 上产生的电流相量。

$$H_k=-\boldsymbol{E}_k\boldsymbol{Y}_{\mathrm{b}}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{n}}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E}_1^{\mathrm{T}}=[(Z_{m2}-Z_{m1})-(Z_{n2}-Z_{n1})]Y_{bk} \tag{7}$$

由于矩阵 $\boldsymbol{A}$ 为实矩阵，由式(2)至式(4)可知，矩阵 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{n}}$ 中的元素 Z_{ij} 为虚数或者 0，则 H_k 为一个实数，此时式(6)可以写为：

$$\begin{bmatrix}I_{kx}\\ I_{ky}\end{bmatrix}=H_k\begin{bmatrix}I_{\mathrm{L}x}\\ I_{\mathrm{L}y}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}I_{\mathrm{p}kx}\\ I_{\mathrm{p}ky}\end{bmatrix} \tag{8}$$

式中：I_{kx} 和 I_{ky} 分别为 $\dot{I}_k$ 的实部和虚部；$I_{\mathrm{p}kx}$ 和 $I_{\mathrm{p}ky}$ 分别为 $\dot{I}_{\mathrm{p}k}$ 的实部和虚部。

考虑 UPFC 有功潮流设定值发生一个微小变化，即电流源 $\dot{I}_{\mathrm{L}}$ 的实部 $I_{\mathrm{L}x}$ 发生一个微小变化(各电气量的初始值用下标 0 表示，初始状态为自然潮流分布状态，变化量用前缀 Δ 表示)，在假设 2 的前提下有：

$$\begin{bmatrix}\Delta I_{kx}\\ \Delta I_{ky}\end{bmatrix}=H_k\begin{bmatrix}\Delta I_{\mathrm{L}x}\\ 0\end{bmatrix} \tag{9}$$

I_k 为 $\dot{I}_k$ 的幅值，则

$$\Delta I_k=\frac{I_{kx0}}{I_{k0}}\Delta I_{kx}=\frac{I_{kx0}H_k}{I_{k0}}\Delta I_{\mathrm{L}x} \tag{10}$$

由式(10)可以看出，H_k 反映了输电线路 k 上流过潮流受 UPFC 安装线路上的有功潮流影响的灵敏程度，H_k 大小只与网架结构和输电线路参数有关，H_k 值越大，改变 UPFC 安装线路潮流对输电线路 k 中流过潮流的影响越大。

由于初始状态选取为自然潮流分布状态，此时 UPFC 通过串联变压器向系统注入的电压源 $\dot{V}_{\mathrm{T0}}$ 为 0。当 $I_{\mathrm{L}x}$ 变化 $\Delta I_{\mathrm{L}x}$ 时，串联变压器两端产生的电压相量 $\dot{V}_{\mathrm{T}}$ 为：

$$\dot{V}_{\mathrm{T}}=[(Z_{22}-Z_{21})-(Z_{12}-Z_{11})]\Delta I_{\mathrm{L}x} \tag{11}$$

联立式(10)和式(11)可得：

$$\dot{V}_{\mathrm{T}}=[(Z_{22}-Z_{21})-(Z_{12}-Z_{11})]\frac{I_{k0}}{I_{kx0}H_k}\Delta I_k \tag{12}$$

由式(3)、式(7)、式(12)可得，通过改变 UPFC 有功潮流设定值使输电线路 k 电流幅值改变 ΔI_k 时，UPFC 串联侧注入系统的功率为：

$$S_{\mathrm{U}}=\dot{V}_{\mathrm{T}}\dot{I}_{\mathrm{L}}^{*}=\frac{I_{k0}Z_{21}'}{I_{kx0}Z_{mn}'}X_k\Delta I_k(I_{\mathrm{L}y}+\mathrm{j}I_{\mathrm{L}x}) \tag{13}$$

式中：$Z_{21}'=(Z_{22}-Z_{21})-(Z_{12}-Z_{11})$；$Z_{mn}'=(Z_{m2}-Z_{m1})-(Z_{n2}-Z_{n1})$。

由第 1 节分析可知，通常情况下 UPFC 安装线路上电流虚轴分量的绝对值 $|I_{\mathrm{L}y}|$ 远小于其实轴分量的绝对值 $|I_{\mathrm{L}x}|$，由式(13)可知 UPFC 串联侧装置与系统的有功交换量要远小于其无功交换量。这意味着与 UPFC 串联侧装置实现潮流转移功能所需的容量相比，并联侧装置维持直流母线电压恒定的容量需求非常小，在考察 UPFC 安装位置合理性时主要考察对串联侧装置设计容量的需求。对于并联侧装置，其安装容量的选取原则将在第 4 节中详细介绍。

文献[9]指出 UPFC 只对改善其安装位置附近电网的潮流分布具有较为显著的作用。事实上，观察式(7)可以看出，若要保证调节 UPFC 安装线路潮流能够较为灵敏地改变输电线路 k 中流过的潮流，二者的电气距离必须足够小。因此，当利用 UPFC 解决输电线路 k 过载问题时，输电线路 k 所连母线的电压相量与 $\dot{V}_{\mathrm{S}}$ 非常接近。当输电线路 k 重载运行时，其传输的有功功率远大于无功功率，因此其线路电流相量与其端电压相量接近或反向，如附录 A 图 A1 所示。由该图可以看出，$|I_{k0}/I_{kx0}|\approx 1$，$\dot{V}_{\mathrm{T}}$ 的幅值 V_{T} 可以近似为：

$$V_{\mathrm{T}}=\left|\frac{Z_{21}'}{H_k}\Delta I_k\right| \tag{14}$$

I_{L} 为 UPFC 安装线路在目标潮流下流过电流的幅值。在 $|I_{\mathrm{L}x}|$ 远大于 $|I_{\mathrm{L}y}|$ 的情况下，I_{L} 可以通过下式估算：

$$I_{\mathrm{L}}=\left|I_{\mathrm{L}0x}+\frac{\Delta I_k}{H_k}\right| \tag{15}$$

式中：$I_{\mathrm{L}0x}$ 为 UPFC 安装线路在自然潮流分布下流过电流的实轴分量。

UPFC 串联侧装置的安装容量由其电压、电流的额定值直接决定。由式(15)可以看出，为转移目标线路 k 上的潮流，串联侧装置需要承受的电流值

与 UPFC 安装线路上的自然潮流分布、目标线路的潮流转移量均密切相关，当 UPFC 安装线路自然潮流较重或者需要从输电线路 k 上转移的潮流较大时，串联侧装置需要承受的电流值可能会比较大。UPFC 串联侧装置的电流额定值 I_{R} 取 UPFC 安装线路的最大可能运行电流 $I_{\mathrm{L,limit}}$。为保证 UPFC 装置能够在不同工况下运行，同时 UPFC 安装线路的输电能力不会下降，$I_{\mathrm{L,limit}}$ 可取 UPFC 安装线路的热稳电流。

由式(14)可以看出，为转移目标线路 k 上的潮流，串联侧装置两端承受的电压幅值与网架结构参数、安装位置和目标线路的潮流转移量有关。在网架结构参数和安装位置确定的情况下，Z_{21}' 和 H_k 确定不变，此时只需确定需要通过 UPFC 装置实现的最大潮流转移量 $\Delta I_{k,\max}$，便可根据式(14)确定串联侧装置的额定电压 V_{TR}。进而确定 UPFC 串联侧装置需要的安装容量 S_{R}：

$$S_{\mathrm{R}}=V_{\mathrm{TR}}I_{\mathrm{R}}=\left|\frac{Z_{21}'}{Z_{mn}'}\right|X_kI_{\mathrm{L,limit}}|\Delta I_{k,\max}| \tag{16}$$

由式(16)可以看出，UPFC 串联侧装置的容量需求与网架结构参数、安装位置、安装线路最大运行电流以及目标线路潮流转移需求有关。

利用 UPFC 装置转移输电线路 k 上的单位潮流所需的 UPFC 串联侧装置安装容量 F_{MVA} 为：

$$F_{\mathrm{MVA}}=\left|\frac{Z_{21}'}{Z_{mn}'}\right|X_kI_{\mathrm{L,limit}} \tag{17}$$

定义 F_{MVA} 为 UPFC 容量需求因子，F_{MVA} 反映了 UPFC 在转移目标线路潮流时所具有的“杠杆效应”。

3　关键影响因素分析

由上一节分析可知，在网架结构参数、安装位置确定的情况下，UPFC 串联侧装置的安装容量与目标线路潮流转移需求 $|\Delta I_{k,\max}|$ 成正比；转移单位潮流所需的 UPFC 串联侧装置安装容量与 UPFC 安装线路的最大可能运行电流 $I_{\mathrm{L,limit}}$ 成正比。

下面将针对两种典型的网架结构，研究网架结构参数、UPFC 安装位置对转移单位潮流所需的 UPFC 串联侧装置安装容量的影响。

图 3(a)为系统中一个输电断面，输电断面将电网分成两个不连通的系统 s 和 r。为不失一般性，假设输电断面上含有 3 条交流线路，线路 1 为制约该输电断面输送能力的关键线路；线路 1 和 2 为 UPFC 的安装位置的备选线路，用来研究 UPFC 安装位置对所需安装容量的影响；线路 3 用来代表该输电断面上的其他输电线路，X_i $(i=1,2,3)$ 表示线路 i 的阻抗。考虑两种典型的网架结构(放射型和环型)，系统 s 为放射型结构，X_{is} $(i=1,2,3)$ 用来等效 3 条线路 s 侧母线到系统 s 中心的电气距离；系统 r 为环形结构，X_{ijr} $(i,j=1,2,3;i\neq j)$ 用来等效 3 条交流线路 r 侧母线之间的电气距离。所研究系统的等效拓扑图如图 3(b)所示，图中：

$$\begin{cases} X_i'=X_{is}+X_i+X_{ir} \qquad i=1,2,3 \\ X_{1r}=\dfrac{X_{12r}X_{13r}}{X_{12r}+X_{23r}+X_{13r}} \\ X_{2r}=\dfrac{X_{12r}X_{23r}}{X_{12r}+X_{23r}+X_{13r}} \\ X_{3r}=\dfrac{X_{23r}X_{13r}}{X_{12r}+X_{23r}+X_{13r}} \end{cases} \tag{18}$$

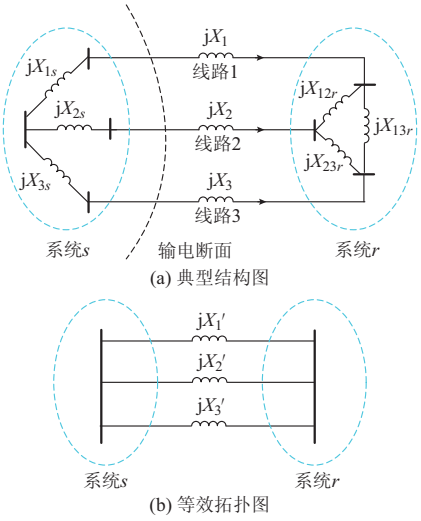

图 3　输电断面示意图

Fig.3　Schematic diagram of transmission section

利用第 2 节所得公式，现分别考察在线路 1 和线路 2 上加装 UPFC 装置的容量需求因子 F_{MVA1} 和 F_{MVA2}：

$$\begin{cases} F_{\mathrm{MVA1}}=\left(X_1'+\dfrac{X_2'X_3'}{X_2'+X_3'}\right)I_{1,\mathrm{limit}} \\ F_{\mathrm{MVA2}}=\left(X_1'+X_2'+\dfrac{X_1'X_2'}{X_3'}\right)I_{2,\mathrm{limit}} \end{cases} \tag{19}$$

式中：$I_{1,\mathrm{limit}}$ 和 $I_{2,\mathrm{limit}}$ 分别为线路 1 和线路 2 的最大运行电流。

根据式(18)和式(19)，分析转移单位潮流所需的 UPFC 串联侧装置安装容量与网架结构参数、安装位置的关系，有如下结论。

对于在断面关键输电线路上直接安装 UPFC 装置对关键线路潮流进行控制的方案，有如下结论。

1)断面输电线路阻抗 X_i $(i=1,2,3)$ 越小，F_{MVA1} 越小。

2)当输电断面的送端或受端系统为放射型结构

时，断面输电线路所连母线到其中心的电气距离 $X_{is}(i=1,2,3)$ 越小，F_{MVA1} 越小。

3)当输电断面的送端或受端系统为环形结构时，正常参数范围内，X_{23r} 对 F_{MVA1} 的影响较小。特别地，当 $X_{12}/X_{13}=(X_{1s}+X_1)/(X_{2s}+X_2)$ 时，X_{23r} 的变化对 F_{MVA1} 无影响。其余情况下，断面输电线路所连母线间的电气距离 $X_{ijr}(i,j=1,2,3;i\neq j)$ 越小，F_{MVA1} 越小。

综上，对于在关键输电线路上直接安装 UPFC 进行控制的方案：输电断面上线路阻抗越小，断面送、受端电网结构越紧密，转移关键输电线路上的单位潮流所需的 UPFC 串联侧装置安装容量越小。

对于在输电断面其他线路上安装 UPFC 对目标线路(制约该输电断面输送能力的关键线路)潮流进行控制的方案，有如下结论。

1)目标线路与 UPFC 安装线路的阻抗 X_1 和 X_2 越小，F_{MVA2} 越小；输电断面上的其他输电线路(除目标线路和 UPFC 安装线路以外的线路)阻抗 X_3 越小，F_{MVA2} 越大。

2)当输电断面的送端或受端系统为放射型结构时，目标线路与 UPFC 安装线路所连母线到其中心的电气距离 X_{1s} 和 X_{2s} 越小，F_{MVA2} 越小；输电断面上的其他输电线路所连母线到其中心的电气距离 X_{3s} 越小，F_{MVA2} 越大。

3)当输电断面的送端或受端系统为环形结构时，目标线路与 UPFC 安装线路所连母线间的电气距离 X_{12r} 越小，F_{MVA2} 越小。

4)目标线路与断面其他输电线路所连母线间的电气距离 X_{13r} 对 F_{MVA2} 的影响较小，但对 F_{MVA2} 影响的变化趋势不能确定：当 $X_{12}/X_{23}=(X_{1s}+X_1)/(X_{3s}+X_3)$ 时，X_{23r} 的变化对 F_{MVA2} 无影响；当 $X_{12}/X_{23}<(X_{1s}+X_1)/(X_{3s}+X_3)$ 时，X_{23r} 越小，F_{MVA2} 越小；当 $X_{12}/X_{23}>(X_{1s}+X_1)/(X_{3s}+X_3)$ 时，X_{23r} 越小，F_{MVA2} 越大。

5)UPFC 安装线路与断面其他输电线路所连母线间的电气距离 X_{23r} 越小，F_{MVA2} 越大。

综上，对于在输电断面其他线路上安装 UPFC 对关键输电线路潮流进行控制的方案：UPFC 安装线路或目标线路的阻抗越小，UPFC 安装线路与目标线路所连母线间的联系越紧密，转移目标线路上的单位潮流所需的 UPFC 串联侧装置安装容量越小。而输电断面上的其他输电线路阻抗越小，断面其他输电线路所连母线到电网中心(放射型电网)或 UPFC 安装线路所连母线(环型电网)的电气距离越小，转移目标线路上的单位潮流所需的 UPFC 串联侧装置安装容量反而越大。

当断面输电线路最大运行电流相同时，直接将 UPFC 安装在关键线路上的容量需求因子比安装在断面其他线路上小，因此在利用 UPFC 解决输电线路过载问题时应优先考虑将 UPFC 直接装在过载线路上，然后考虑与过载线路联系紧密的线路；特别地，当输电断面由两条输电线路组成，二者的最大运行电流又相同时，在这两条线路上加装 UPFC 装置实现相同的潮流转移目标所需的 UPFC 串联侧装置容量相同。

由上述分析结论可以看出：在发展初期、电气连接较为稀疏的电网中，应用 UPFC 转移潮流的成本十分巨大；在发展成熟、电气连接紧密电网中应用 UPFC 解决断面关键输电线路过载问题的可行性较大。

4　UPFC 安装位置和容量的优化方法

基于第 2 节提出的 UPFC 安装容量计算方法，本文提出的 UPFC 安装位置和容量的优化方法步骤如下，其流程图如附录 A 图 A2 所示。

步骤 1：识别并确定关键输电断面[2-3]，对输电断面进行 $N-1$ 扫描，针对某一 $N-1$ 工况，若存在过载线路，则进行第 2 步；若无输电线路过载，则继续扫描下一条线路，若 $N-1$ 扫描结束，则进行步骤 4。

步骤 2：在不加装 UPFC 情况下计算该 $N-1$ 工况下的潮流，选取过载情况最严重的输电线路为需要转移潮流的目标线路。利用第 2 节中的式(16)计算各输电线路上加装 UPFC 所需的串联侧装置容量。此时目标线路潮流转移需求 $\Delta I_{k,\max}$ 为目标线路自然潮流分布下的电流幅值与其热稳电流之差。

步骤 3：记录各条输电线路上加装 UPFC 所需的串联侧装置容量，将该工况对应的发生 $N-1$ 故障的输电线路记录到故障线路集合中，返回步骤 1，继续扫描下一条线路。

步骤 4：各条输电线路上加装 UPFC 所需的串联侧装置容量为所有记录工况下该输电线路上所需加装 UPFC 串联侧装置容量的最大值。

步骤 5：所需 UPFC 串联侧装置安装容量最小同时不在故障线路集合中的输电线路即为 UPFC 装置的最终安装位置，对应的串联侧装置容量为最终串联侧装置的安装容量。

步骤 6：在串联侧装置安装位置和容量确定后，为提高 UPFC 装置的可靠性，可选取并联侧装置安装容量与串联侧相同，此时当串联侧换流器因故障退出运行时，可以改变并联侧换流器接入系统的方

式，使 UPFC 运行在静止同步串联补偿器（SSSC）状态，继续对有功潮流进行调节。

目前已经投运的 4 个 UPFC 工程串联侧与并联侧装置的安装容量如附录 A 表 A1 所示[19-23]。已有 UPFC 工程中并联侧装置容量的选取均满足“并联侧装置安装容量与串联侧相同”的原则。文献[22]中特别提到，在南京西环网 UPFC 示范工程的设计过程中，并联侧换流器选取与串联侧换流器同样的容量，是为了在一个串联侧换流器故障时将并联侧换流器改接至串联侧，使示范工程能够以双回线 SSSC 方式运行，从而增加工程的可靠性。

此外，实际 UPFC 工程在设计时需要考虑对多个典型运行方式的适用性，在上述方法步骤 4 中确定各条输电线路上所需加装 UPFC 串联侧装置容量时，应取所有运行方式下该输电线路上所需加装 UPFC 串联侧装置容量的最大值。

与利用最优潮流算法解决 UPFC 选址定容问题相比，本文所提优化方法更多从工程应用的角度出发，不需要借助复杂的最优算法，只通过简单的代数运算便可确定 UPFC 的安装位置和容量。

5　案例分析

本节以 IEEE 39 节点系统为例说明所提出的 UPFC 串联侧装置安装容量计算方法、关键影响因素分析的有效性和 UPFC 安装位置和容量优化方法的可行性，IEEE 39 节点系统（电压基值为 345 kV，容量基值为 100 MVA）如附录 A 图 A3 所示。

选取区域 A 送出断面为研究断面，区域 A 中的有功功率通过线路 2-1，2-3，26-27 送出，潮流在送出通道上分布不均衡。线路 2-3 潮流较重，是制约该输电断面的输送能力的关键线路。因此，可以考虑在该系统中应用 UPFC 装置，改善该输电断面各输电线路上的潮流分布，解决线路 2-3 的过载问题，进而提高区域 A 送出断面的输电能力。

首先，研究利用 UPFC 装置转移线路 2-3 上的单位潮流所需的 UPFC 串联侧装置安装容量，即容量需求因子 F_{MVA}。不同网架结构参数下容量需求因子 F_{MVA} 的仿真值和计算值如表 1 所示。计算时，UPFC 安装线路的最大可能运行电流 $I_{\mathrm{L,limit}}$（标幺值）取 UPFC 安装线路的热稳电流，各输电线路热稳电流均取 0.9 kA。F_{MVA} 的仿真值可以通过如下途径获得：UPFC 装置的初始潮流设定值为安装线路的自然潮流，改变 UPFC 装置有功功率设定值，线路 2-3 上电流幅值改变量为 ΔI（标幺值），UPFC 串联变压器两端电压差的幅值为 V_{T}（标幺值），则串联侧装置容量需求的仿真值为 $V_{\mathrm{T}} I_{\mathrm{L,limit}}$，$F_{\mathrm{MVA}}$ 的仿真值为 $V_{\mathrm{T}} I_{\mathrm{L,limit}} / \Delta I$；串联侧装置容量需求的计算值通过式（16）得到，$F_{\mathrm{MVA}}$ 的计算值通过式（17）得到；表 1 中数据均为标幺值。

表 1　不同网架结构参数下 F_{MVA} 的仿真值和计算值

Table 1　Simulated and calculated values of F_{MVA} under different grid structure parameters

输电线路	线路阻抗/10^{-2}	线路 2-3 的 F_{MVA}		线路 26-27 的 F_{MVA}		线路 2-1 的 F_{MVA}	
		仿真值	计算值	仿真值	计算值	仿真值	计算值
线路 2-3	0.07+j0.76	0.35	0.35	0.54	0.55	0.99	0.99
	0.13+j1.51	0.38	0.39	0.60	0.61	1.09	1.10
	0.26+j3.02	0.46	0.47	0.74	0.74	1.32	1.31
线路 25-26	0.16+j1.61	0.35	0.36	0.53	0.52	1.11	1.14
	0.32+j3.23	0.38	0.39	0.60	0.61	1.09	1.10
	0.64+j6.46	0.44	0.45	0.79	0.80	1.05	1.04
线路 26-27	0.07+j0.73	0.37	0.38	0.57	0.57	1.10	1.11
	0.14+j1.47	0.38	0.39	0.60	0.61	1.09	1.10
	0.28+j2.94	0.41	0.42	0.69	0.70	1.07	1.07

标准 IEEE 39 节点系统中，线路 2-3，25-26，26-27 的线路阻抗分别为 0.13＋j1.51，0.32＋j3.23，0.14＋j1.47（标幺值）。在线路 2-3 上加装 UPFC 装置属于在关键线路上直接安装 UPFC 进行控制的方案，通过改变线路 2-3，26-27，25-26 的线路阻抗分析输电断面上线路阻抗和送端电网紧密程度的影响。而在线路 2-1 和 26-27 上加装 UPFC 装置属于在输电断面其他线路上安装 UPFC 对目标线路潮流进行控制的方案，通过改变线路 2-3，25-26，26-27 的线路阻抗可以分析输电断面上线路阻抗、UPFC 安装线路与目标线路所连母线间的电气距离、断面其他输电线路所连母线到电网中心的距离（区域 A 的拓扑结构可以看成以母线 2 为中心的放射型电网）等因素对 F_{MVA} 的影响。

由表 1 中数据可以看出，网架结构参数和安装位置对 F_{MVA} 的影响与第 3 节中分析得出的结论完全一致。同时，仿真结果与通过式（17）计算得到的结果十分接近。

线路 2-3 上 UPFC 串联侧装置容量需求的计算值和仿真值与线路 2-3 潮流转移量 ΔI 的关系如附录 A 图 A4 所示。由该图可以看出，在潮流转移量较大的情况下，通过式(16)计算得到的 UPFC 串联侧装置容量仍较准确。因此，只要确定需要通过 UPFC 实现的潮流转移量，通过式(16)便可准确计算出 UPFC 串联侧装置需要的安装容量。

对区域 A 送出断面进行 $N-1$ 故障扫描发现，当线路 26-27 因故障退出运行时，线路 2-3 上电流将达到 1.06 kA，超过其热稳电流。其余 $N-1$ 故障下，无线路过载。为了保证在线路 26-27 退出运行时线路 2-3 的安全稳定运行，需要通过 UPFC 实现的潮流转移量为 1.06 kA－0.9 kA＝0.16 kA。利用式(16)便可得到在电网各条线路上加装 UPFC 装置转移线路 2-3 上 0.16 kA 的潮流所需的容量。通过计算发现在线路 2-3 或线路 2-1，1-39，39-9，9-8 上安装 UPFC 装置其串联侧装置的容量需求最小，均为 79 MVA，上述线路均可作为备选方案。计算在任一线路上加装 UPFC 装置所需的串联侧装置容量消耗的时间约为 5 ms(计算使用的 CPU 主频为 3.6 GHz)，将全部线路作为 UPFC 安装的备选线路，得到所有备选线路上加装 UPFC 的容量需求也只需大约 0.2 s 的时间，计算过程简单，耗时较少。

由附录 A 图 A3 可以看出，当线路 26-27 断开后，线路 2-3 与线路 2-1，1-39，39-9，9-8 中任意一条线路均可构成一个割集断面，由第 3 节分析可知，当线路最大运行电流取值相同时，在这几条线路上加装 UPFC 实现相同的潮流控制目标所需的 UPFC 串联侧装置容量相同。考虑到正常工况下的潮流控制需求，将 UPFC 安装在线路 2-3。仿真得到此时 UPFC 串联装置容量为 78 MVA，与计算结果吻合。此时串联侧装置向系统注入的有功功率为 15 MW，可见 UPFC 为实现潮流转移功能对并联侧装置的容量需求远小于对串联侧装置的容量需求。

6　结语

本文针对利用 UPFC 装置的潮流控制能力，改善输电断面潮流分布、解决关键输电线路过载问题的场景，推导了 UPFC 串联侧装置所需安装容量与关键输电线路潮流转移需求、UPFC 安装位置、网架结构参数之间的关系，提出 UPFC 串联侧装置安装容量的计算方法。在此基础上，本文分析了影响 UPFC 装置安装容量的主要因素，并针对两种典型的网架结构，研究了转移单位潮流所需的 UPFC 串联侧装置安装容量受 UPFC 安装位置、网架结构参数的影响情况。

进一步，本文提出了一套简单实用的 UPFC 安装位置和容量的优化方法，所提出的方法可以较为准确地找出能够解决断面关键输电线路过载问题同时所需 UPFC 安装容量最小的安装位置，并给出 UPFC 装置的最优安装容量，为 UPFC 工程的选址和定容提供了有力支撑。然而，本文所提方法只适用于利用 UPFC 装置改善输电断面潮流分布的场景，其他应用场景下或者多个优化目标下 UPFC 装置选址定容的相关问题有待进一步研究。

附录见本刊网络版(http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx)。

参考文献

[1] 赵峰，孙宏斌，张伯明.基于电气分区的输电断面及其自动发现[J].电力系统自动化，2011，35(5)：42-46.
ZHAO Feng，SUN Hongbin，ZHANG Boming. Electric zone division based automatic discovery of flowgates[J]. Automation of Electric Power Systems，2011，35(5)：42-46.

[2] 罗钢，陈金富，石东源，等.基于复杂网络理论的关键输电断面分析[J].中国电机工程学报，2013，33(25)：147-155.
LUO Gang，CHEN Jinfu，SHI Dongyuan，et al. Key transmission sections analysis based on complex network theory[J]. Proceedings of the CSEE，2013，33(25)：147-155.

[3] 杨燕，文福拴，王洁，等.计及关键支路的输电断面自动确定方法[J].电力系统自动化，2012，36(14)：6-10.
YANG Yan，WEN Fushuan，WANG Jie，et al. A method for automatic discovery of transmission sections with critical branches taken into consideration[J]. Automation of Electric Power Systems，2012，36(14)：6-10.

[4] 李国庆，宋莉，李筱婧.计及 FACTS 装置的可用输电能力计算[J].中国电机工程学报，2009，29(19)：36-42.
LI Guoqing，SONG Li，LI Xiaojing. Available transfer capability calculation considering FACTS controllers[J]. Proceedings of the CSEE，2009，29(19)：36-42.

[5] GYUGYI L，SCHAUDER C D，WILLIAMS S L，et al. The unified power flow controller：a new approach to power transmission control[J]. IEEE Trans on Power Delivery，1995，10(2)：1085-1097.

[6] LARSSON M，REHTANZ C. Increase of transfer capability through OPF-based wide area control of FACTS[J]. Automation of Electric Power Systems (in Chinese)，2005，29(16)：35-41.

[7] 蔡晖，祁万春，黄俊辉，等.统一潮流控制器在南京西环网的应用[J].电力建设，2015，36(8)：73-78.
CAI Hui，QI Wanchun，HUANG Junhui，et al. Application of UPFC in Nanjing western power system[J]. Electric Power Construction，2015，36(8)：73-78.

[8] 祁万春，杨林，宋鹏程，等.南京西环网 UPFC 示范工程系统级控制策略研究[J].电网技术，2016，40(1)：92-96.
QI Wanchun，YANG Lin，SONG Pengcheng，et al. UPFC system control strategy research in Nanjing western power grid[J]. Power System Technology，2016，40(1)：92-96.

[9] RAJABI-GHAHNAVIEH A, FOTUHI-FIRUZABAD M, OTHMAN M. Optimal unified power flow controller application to enhance total transfer capability [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(4): 358-368.

[10] SHAHEEN H I, RASHED G I, CHENG S J. Optimal location and parameter setting of UPFC for enhancing power system security based on differential evolution algorithm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, 33(1): 94-105.

[11] ONGSAKUL W, JIRAPONG P. Optimal allocation of FACTS devices to enhance total transfer capability using evolutionary programming[C]// IEEE International Symposium on Circuits and Systems, May 23-26, 2005, Kobe, Japan: 4175-4178.

[12] SINGH S N, DAVID A K. Optimal location of FACTS devices for congestion management [J]. Electric Power Systems Research, 2001, 58(2): 71-79.

[13] 邱成龙.统一潮流控制器潮流控制策略及选址定容研究[D].重庆:重庆大学,2014.

[14] 甄宏宁,梁志瑞,王莹,等.南京西环网装设 UPFC 装置的主设备容量优化选择[J].江苏电机工程,2015,34(6):18-22.
ZHEN Hongning, LIANG Zhirui, WANG Ying, et al. The optimal capacity selection of UPFC installed in Nanjing 220 kV western power grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(6): 18-22.

[15] FUJITA H, WATANABE Y, AKAGI H. Control and analysis of a unified power flow controller[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1999, 14(6): 1021-1027.

[16] LU R, LU A. Applications of the superposition theorem to nonlinear resistive circuits[C]// IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, December 4-7, 2006, Singapore: 1333-1336.

[17] 周庭阳,张红岩.电网络理论:图论,方程,综合[M].北京:机械工业出版社,2008:60-73.

[18] BALABANIAN N, BICKART T A, SESHU S. Electrical network theory[M]. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 1969: 59-117.

[19] MEHRABAN A S, EDRIS A, SCHAUDER C D, et al. Installation, commissioning, and operation of the world's first UPFC on the AEP system[C]// International Conference on Power System Technology, August 18-21, 1998, Beijing, China: 323-327.

[20] KIM S Y, YOON J S, CHANG B H, et al. The operation experience of KEPCO UPFC [C]// Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), September 27-29, 2005, Nanjing, China: 2502-2505.

[21] FARDANESH B, SCHUFF A. Dynamic studies of the NYS transmission system with the Marcy CSC in the UPFC and IPFC configurations [C]// IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, September 7-12, 2003, Dallas, USA: 1126-1130.

[22] 国网江苏省电力公司.统一潮流控制器工程实践-南京西环网统一潮流控制器示范工程[M].北京:中国电力出版社,2015:38-41.

[23] 凌峰,李九虎,田杰,等.适用于双回线路的统一潮流控制器系统结构优化分析[J].电力系统自动化,2015,39(21):113-119. DOI:10.7500/AEPS20141115002.
LING Feng, LI Jiuhu, TIAN Jie, et al. Optimization analysis of UPFC system structure for double-circuit lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 113-119. DOI: 10.7500/AEPS20141115002.

宋鹏程(1990—),男,博士研究生,主要研究方向:大规模交直流电力系统分析与柔性交流输电。E-mail: 11310036@zju.edu.cn

徐　政(1962—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、风力发电技术与风电场并网技术。E-mail: xuzheng007@zju.edu.cn

窦　飞(1979—),男,高级工程师,主要研究方向:电力系统规划技术。E-mail: doufei@js.sgcc.com.cn

(编辑　蔡静雯)

Critical Factor Analysis and Optimization Method for Placement and Sizing of Unified Power Flow Controller

SONG Pengcheng[1], *XU Zheng*[1], *DOU Fei*[2], *CAI Hui*[3]

(1. College of Electric Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;
3. Economic Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210008, China)

Abstract: In view of the application scenario where the unified power flow controller (UPFC) is operated to improve the power flow distribution of a transmission section and alleviate the overload of transmission lines, the formulas of determining the capacity demand of the series device of UPFC concerning the amount of transferred power flow, the location of UPFC and grid structure parameters are deduced based on electrical network theories. Then, the calculation method of the installed capacity of the series device of UPFC is proposed. On this basis, the critical factors affecting the capacity requirement are studied. In two typical power grid configurations, the influences of UPFC location and grid structure parameters on the required capacity per transferred power flow are analyzed. Furthermore, a simple and practical method for the optimization of the placement and sizing of the UPFC device is proposed. Finally, case study results verify the effectiveness of the proposed calculation method, the critical factor analysis, and the feasibility of the optimization method.

Key words: unified power flow controller (UPFC); capacity demand; factor analysis; optimization method