

Evaluación del controlador unificado de flujos de potencia en un sistema eléctrico de potencia a través del software PSAT.

Evaluation of the unified controller of power flows in an electrical power system through the PSAT software.

C.C Gonzalez Correa¹, C.L Trujillo Rodríguez²

¹LIFAE. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, ing.cristiangonzalez@ieec.org

²LIFAE. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, cltrujillo@udistrital.edu.co

RECIBIDO: abril 21, 2017. ACEPTADO: junio 02, 2017. VERSIÓN FINAL: noviembre 01, 2017

RESUMEN

Los Sistemas de Trasmisión AC Flexible (FACTS) se caracterizan por permitir controlar de una manera más adecuada los parámetros de una línea de transmisión y proporcionan una mayor capacidad de transferencia de potencia. El Controlador Unificado de Flujos de Potencia (UPFC) es uno de los dispositivos FACTS más completo y flexible, ya que permite controlar todos los parámetros en una línea de transmisión. En el presente artículo se presenta el impacto de UPFC, así como las modificaciones que tiene el flujo de carga con la implementación de este. Se realiza un análisis de la mitigación de las pérdidas de potencia del sistema, así como la mejora que se obtiene de la capacidad de carga para la transferencia de potencia en una línea de transmisión y la mejora de estabilidad de tensión. La validación del funcionamiento del UPFC se realiza en una red estándar IEEE 14 nodos a través de simulación. Finalmente, se presentan las conclusiones

PALABRAS CLAVE: Dispositivos FACTS, UPFC, Perfiles de tensión, Estabilidad de tensión, Perdidas de potencia.

ABSTRACT

Flexible AC Transmission Systems (FACTS) are characterized by better control of the parameters of a transmission line and provide greater power transfer capacity. The Unified Power Flow Controller (UPFC) is one of the most complete and flexible FACTS devices, since it allows controlling all parameters in a transmission line. This paper presents the impact of UPFC, as well as the modifications that the load flow has with the implementation of this one. An analysis of the mitigation of power losses of the system is made, as well as the improvement that is obtained of the load capacity for the transfer of power in a transmission line and the improvement in the voltage profile. The validation of the operation of the UPFC is performed in an IEEE 14- nodes system through simulation. Finally, the conclusions are presented.

KEYWORDS: Devices FACTS, UPFC, Voltage profiles, voltage stability, Loss of power.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia (SEP) son sistemas complejos y de gran tamaño que vienen presentando una reestructuración acelerada debido al aumento de la demanda. Asociado a esto, la desregulación del mercado eléctrico; las restricciones para la construcción de nuevas líneas de transmisión y la disponibilidad del recurso primario, ha traído como consecuencia problemas de estabilidad de tensión en los nodos del sistema, sobrecarga en las líneas de transmisión, aumento de pérdidas de potencia y congestión en el sistema [1].

Los Sistemas de Trasmisión AC Flexibles (FACTS) son dispositivos basados en electrónica de potencia que permiten controlar uno o más parámetros de una línea de transmisión con el objetivo de mejorar la capacidad de control y la capacidad de transferencia de potencia en sistemas de corriente alterna [2], [3]. Los dispositivos FACTS mitigan las pérdidas de potencia, descongestionan las líneas de transmisión sobrecargadas, aumentan la cargabilidad de las líneas de transmisión, mejoran los perfiles de tensión en los nodos e incrementan la estabilidad del sistema [4], [6].

Los dispositivos FACTS pueden controlar parámetros de impedancia, tensión y ángulo mediante el suministro

o consumo de potencia reactiva del dispositivo, de esta forma se tiene mayor control y flexibilidad del sistema [5]. Los FACTS más utilizados son el compensador estático de reactivos (SVC), el cual es un dispositivo conectado en derivación, que regula la tensión del sistema en un nodo mediante el control de inyección de reactivos. El condensador serie controlado por tiristores (TCSC), el cual consiste en un banco de condensadores en serie con el fin de proporcionar una reactancia capacitiva serie suavemente variable. El Compensador Estático Sincrónico (STATCOM), el cual se conecta en derivación y consume o genera reactivos debido a que no tiene partes móviles [7], [8]. El controlador unificado de flujos de potencia (UPFC) es el dispositivo FACTS más completo y versátil, ya que permite controlar todos los parámetros de una línea de transmisión [9], [10].

En este artículo se tiene como objetivo analizar el comportamiento del UPFC en un SEP. Se evalúa el dispositivo para la mejora de estabilidad de tensión, así como la evaluación de mejora de perfiles de tensión y mitigación de pérdidas de potencia. Se encuentra organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta la definición y modelado del UPFC, en la sección 3 se analiza un caso de estudio, en la sección 4 se presenta la metodología implementada en este artículo para realizar las simulaciones y los resultados obtenidos en la simulación. Finalmente, se presentan las conclusiones en la sección 5.

2. CONTROLADOR UNIFICADO DE FLUJOS DE POTENCIA

El UPFC está compuesto por dos convertidores auto conmutados DC/AC (inversores) acoplados a un enlace común de tensión DC a través de un condensador que funciona como almacenador de energía, como se ilustra en la figura 1.

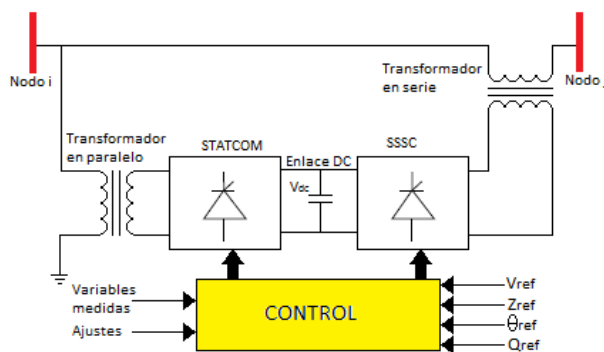


Figura 1. Diagrama esquemático del UPFC Fuente. Elaboración propia.

El UPFC tiene la característica de controlar la magnitud de la tensión en sus terminales, así como el flujo de potencia activa y reactiva [15]. El convertidor 1 está conectado en paralelo a una línea que tiene como función suministrar una potencia activa que es demandada por el convertidor 2, así como el suministro o consumo de potencia reactiva, por lo que permite tener control en la magnitud de la tensión. El convertidor 2 está conectado en serie a una línea de transmisión, este convertidor tiene como función controlar el flujo de potencia inyectando una tensión con magnitud y fase controlables. El UPFC es una combinación de un STATCOM y un compensador sincrónico estático serie (SSSC) [11], [12].

2.1. Modelo UPFC en un SEP

En la figura 2 se ilustra el modelo de UPFC. Este modelo toma el dispositivo como ideal (sin pérdidas), también se desprecia la resistencia de la línea de transmisión, sin embargo, para la resolución del flujo de carga se introduce un nodo ficticio (nodo k).

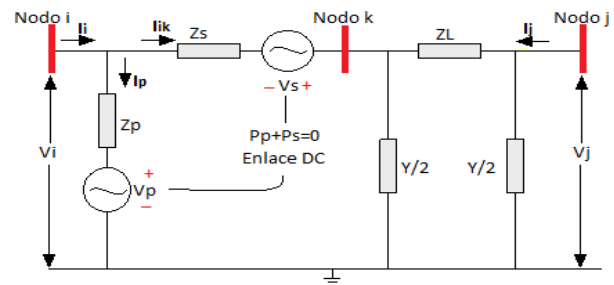


Figura 2. Modelo UPFC Fuente. Elaboración propia.

El modelo toma dos fuentes ideales de tensión basadas en tecnologías VSC por sus siglas en inglés (Voltage Source Converter), con la restricción que la potencia activa no se intercambia con el sistema, por lo que $P_p + P_s = 0$, en consecuencia la tensión DC permanece constante [13].

La fuente de tensión en paralelo está representada por:

$$V_p = V_p(\cos\delta_p + j\text{sen}\delta_p) \quad (1)$$

Donde V_p es la magnitud y δ_p es el ángulo de fase. Esta fuente puede ser representada fasorialmente $V_p \angle \delta_p$; y se tiene como límites ($V_{pmin} \leq V_p \leq V_{pmax}$) y ($0 \leq \delta_p \leq 2\pi$).

La fuente de tensión en serie está representada por:

$$V_s = V_s(\cos\delta_s + j\text{sen}\delta_s) \quad (2)$$

Donde V_S es la magnitud y δ_S es el ángulo de fase; esta fuente puede ser representada fasorialmente como $V_S \angle \delta_S$; y se tiene como límites ($V_{Smin} \leq V_S \leq V_{Smax}$) y ($0 \leq \delta_S \leq 2\pi$).

Las ecuaciones de tensión y corriente del modelo de la figura 2 son [14]:

$$V_i = V_k + jX_S I_{ik} - V_S \quad (3)$$

$$I_i = \frac{V_k}{jX_P} + I_{ik} \left(1 + \frac{X_S}{X_P}\right) - \frac{V_S}{jX_P} - \frac{V_P}{jX_P} \quad (4)$$

Las ecuaciones (3) y (4) están en términos de las variables del nodo ficticio, V_k e I_{ik} , por lo que es necesario dejarlo en términos de las variables del nodo j .

$$V_k = V_j \left(1 - \frac{X_L}{X_C}\right) - jX_L I_j \quad (5)$$

$$I_k = V_j \left(\frac{X_L - 2X_C}{jX_C^2}\right) + \left(\frac{X_L}{X_C} - 1\right) I_j \quad (6)$$

Remplazando las ecuaciones (5) y (6) en (3) y (4) se obtiene.

$$V_i = \left(\frac{X_C^2 - X_L X_C + X_S X_L - 2X_S X_C}{X_C^2}\right) V_j + \left(\frac{j(X_S X_L - X_S X_C - X_L X_C)}{X_C}\right) I_j - V_S \quad (7)$$

$$I_i = \left(\frac{X_C^2 - X_L X_C + X_P X_L - 2X_P X_C + X_S X_L - 2X_S X_C}{jX_C^2 X_P}\right) V_j + \left(\frac{-X_L X_C + X_P X_L + X_S X_L - X_P X_C - X_S X_C}{X_C X_P}\right) I_j - \frac{V_S}{jX_P} - \frac{V_P}{jX_P} \quad (8)$$

En las ecuaciones (7) y (8) se evidencia que las variables de los nodos adyacentes al UPFC se pueden modificar a través de la inyección de una tensión o corriente con magnitud y fase controlable

2.2. Modelo dinámico UPFC

En la figura 3 se muestra el modelo dinámico del UPFC. Este modelo es utilizado para simulaciones en el dominio del tiempo, flujo óptimo de potencia (OPF) y flujo continuo de potencia (CPF), utilizado para el análisis de estabilidad de tensión [16], [17].

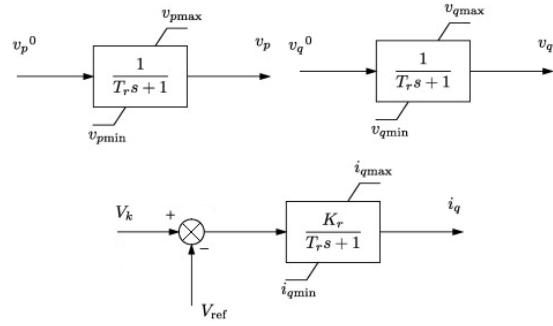


Figura 3. Diagramas de bloques de control UPFC. Fuente. Elaboración propia.

El modelo dinámico tiene 3 variables de estado (v_p, v_q, i_q) y sus respectivas ecuaciones diferenciales son [16]:

$$\dot{V}_p = \frac{1}{T_r} (V_{p0} - V_p) \quad (9)$$

$$\dot{V}_q = \frac{1}{T_r} (V_{q0} - V_q) \quad (10)$$

$$\dot{i}_q = \frac{1}{T_r} (K_r (V_{ref} - V_k) - i_q) \quad (11)$$

Donde:

K_r : Ganancia del regulador

T_r : Constante de tiempo del regulador

3. CASO DE ESTUDIO

Para realizar las simulaciones se utilizó la red estándar IEEE 14 nodos (Figura 4), la cual consta de 14 líneas de transmisión, 11 cargas estáticas, 4 transformadores y 5 generadores, de los cuales 3 son compensadores estáticos de potencia reactiva. El sistema cuenta con 2 zonas una de transmisión (69 KV) y otra de distribución (13.8 KV); se utiliza una base de 100 MVA. La simulación se realizó en el toolbox de sistemas eléctricos de potencia PSAT, el cual se fundamenta en una librería basada en Simulink. PSAT permite rutinas de flujo de carga, simulaciones en el dominio del tiempo, CPF, OPF y análisis de estabilidad de pequeñas señales [18].

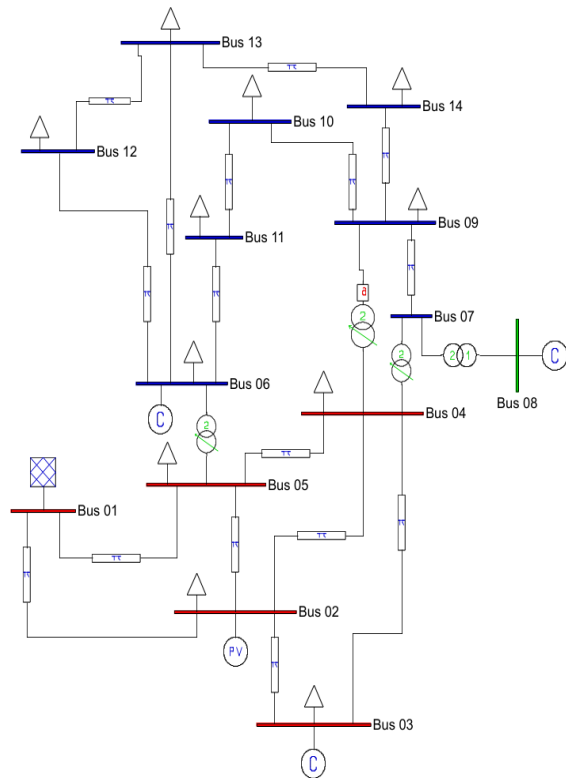


Figura 4. Red estándar IEEE 14 nodos

4. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Los dispositivos FACTS son dispositivos costosos, por lo que existen diversas técnicas de optimización evolutivas o heurísticas que buscan la ubicación óptima del dispositivo en un SEP. Sin embargo, en el presente artículo la ubicación del UPFC se realiza de forma manual, para cada uno de los nodos del sistema y se evalúa en cuales tiene un mejor rendimiento, el objetivo es analizar el comportamiento del UPFC al interior de un SEP, por eso se deja como trabajo futuro el desarrollo y exploración de técnicas de optimización que permitan identificar la ubicación más adecuada del UPFC.

Los resultados a continuación presentados, corresponden a la implementación del UPFC en una red estándar IEEE 14 nodos, donde se analiza la estabilidad de tensión, perfiles de tensión y pérdidas de potencia del sistema, con y sin la implementación del dispositivo FACTS; así como las modificaciones que tiene el flujo de carga insertando el UPFC. Los flujos de carga se realizan por el método de Newton Raphson (NR) y el método de integración por reglas trapezoidales.

Las características del UPFC implementado en este artículo se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Características UPFC

Parámetro	Valor
Ganancia del regulador (K_r)	50
Constante del tiempo del regulador (T_r)	0.1
Compensación serie	25%
Corriente máxima (i_{qmax})	1.2 p.u.
Corriente mínima (i_{qmin})	-0,8 p.u
Frecuencia	60 Hz
Voltaje de cuadratura máximo (V_{qmax})	1.2 p.u.
Voltaje serie máximo (V_{pmax})	1.2 p.u.

Fuente. Elaboración propia

4.1. Estabilidad de tensión y perfiles de tensión

Para el análisis de estabilidad de tensión se realiza una rutina CPF la cual consiste en incrementar la carga a través del parámetro λ , a partir de un estado inicial estable (P_{L0}, Q_{L0}) hasta que el sistema se vuelve inestable. El incremento de carga está dado por:

$$PL = P_{L0}(1 + \lambda) \quad (12)$$

$$QL = Q_{L0}(1 + \lambda) \quad (13)$$

Para la ubicación adecuada del dispositivo se realiza una rutina CPF para el caso base. El caso base es la red estándar IEEE de 14 nodos sin UPFC. Luego se incorpora el UPFC en cada uno de los nodos y se evalúa el parámetro de carga λ para la estabilidad de tensión. Se toman los dos valores máximos como nodos adecuados.

Después de la simulación se identificó que los nodos adecuados para mejorar la estabilidad de tensión con base al parámetro de carga, son del nodo 14 al nodo 9 y del nodo 14 al nodo 13. La figura 5 muestra el parámetro de carga λ para el caso base y para los nodos en que el UPFC presenta un mejor rendimiento. La ubicación del dispositivo FACTS desde el nodo 14 al nodo 9 aumenta 0,1446 el parámetro de carga y 0,0908 cuando el dispositivo se ubica desde el nodo 14 al nodo 13.

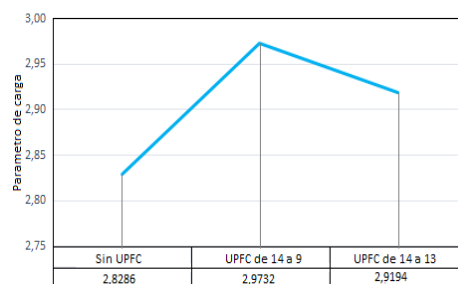


Figura 5. Parámetros de carga. Fuente. Elaboración propia.

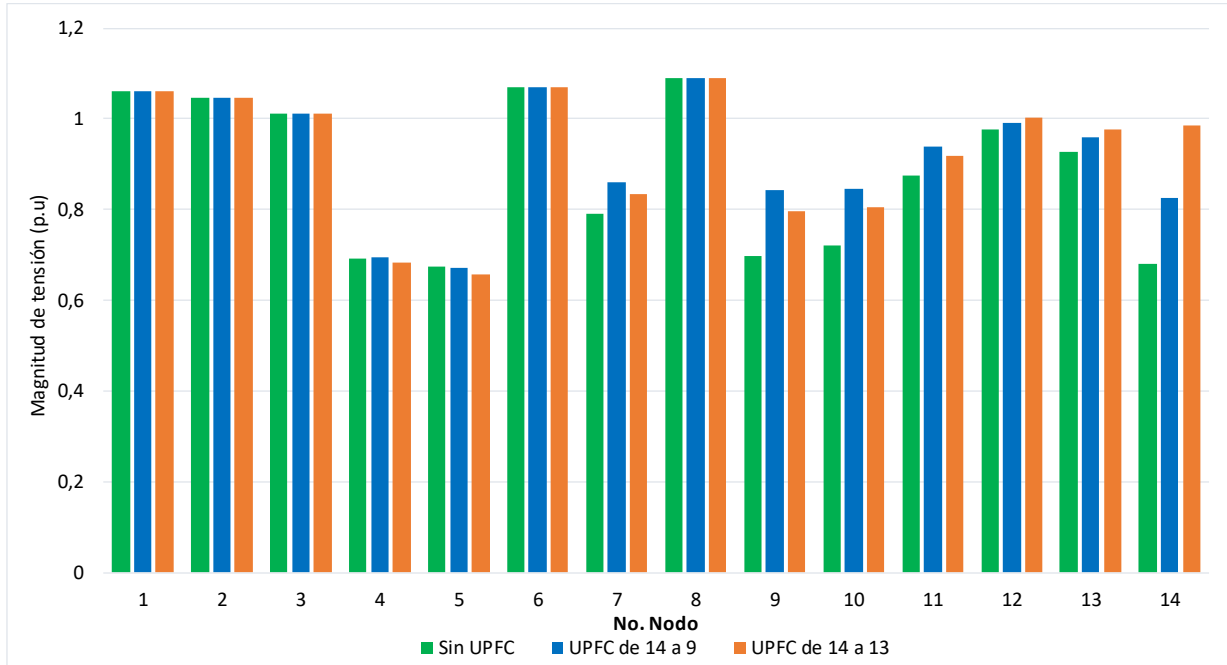
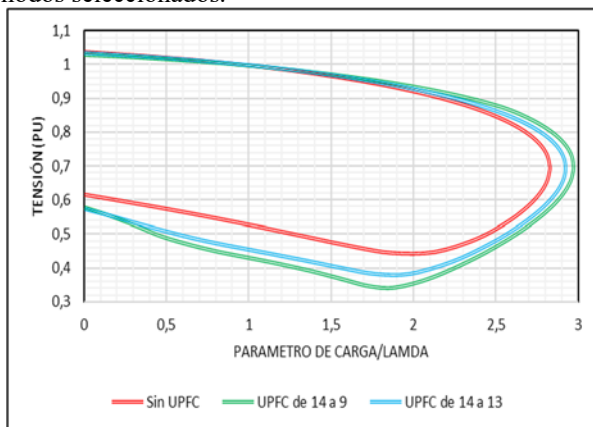


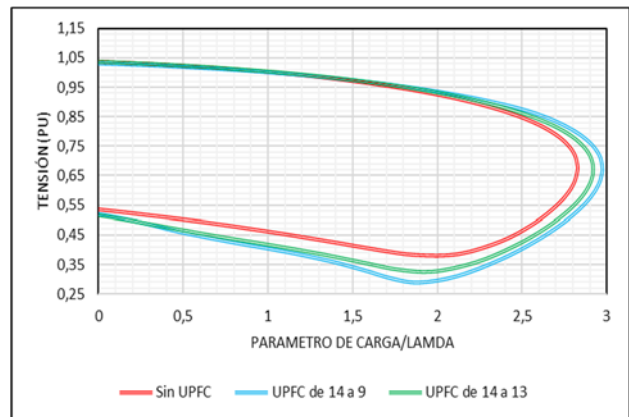
Figura 6. Perfiles de tensión. Fuente. Elaboración propia.

En la figura 6 se ilustran los perfiles de tensión con la implementación del dispositivo en los nodos seleccionados. En esta se muestra que los nodos críticos son los nodos 4, 5 y 14, con tensiones de 0,69289 p.u., 0,67532 p.u., y 0,68148 p.u., respectivamente. Se evidencia para los dos casos de inclusión del UPFC que existe una mejora en los perfiles de tensión respecto al caso base, particularmente en los nodos más cercanos a la ubicación del dispositivo, como es el caso del nodo 14, el cual con la implementación del UPFC desde el nodo 14 al nodo 9, aumenta a 0,82488 p.u la magnitud de la tensión y 0,98602 p.u cuando se ubica desde el nodo 14 al nodo 13.

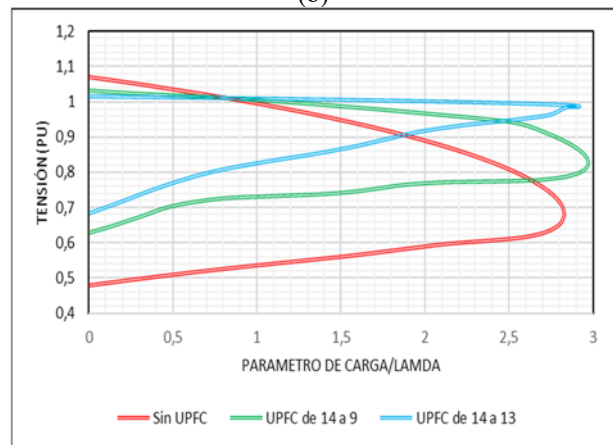
La figura 7 muestra las curvas PV para los nodos críticos con y sin la implementación del UPFC en los nodos seleccionados.



(a)



(b)



(c)

Figura 7. Curvas PV (a) Nodo 4, (b) Nodo 5, (c) Nodo 14. Fuente. Elaboración propia

Se puede evidenciar que la incorporación del UPFC en un SEP incrementa la estabilidad de tensión (figura 7), al igual que ayuda a mantener la magnitud de la tensión cerca a los valores nominales a medida que aumenta la carga. Es de resaltar que se obtiene mejor resultado en los nodos cercanos a la ubicación del UPFC.

4.2. Pérdidas de potencia y flujo de carga

Para realizar el análisis de mitigación de pérdidas de potencia activa se realiza el flujo de carga para el caso base y se extraen los datos de pérdidas de potencia activa y reactiva. Se repite el procedimiento incluyendo el dispositivo FACTS para todos los casos. En la tabla 2 se muestran las 6 conexiones más eficientes del dispositivo para la mitigación de pérdidas de potencia activa.

Tabla 2. Pérdidas de potencia

Sin UPFC	Potencia activa [MW]	29,452
	Potencia Reactiva [MVAR]	91,576
UPFC de 1 a 5	Potencia activa [MW]	19,99
	Potencia Reactiva [MVAR]	86,773
UPFC de 1 a 2	Potencia activa [MW]	18,566
	Potencia Reactiva [MVAR]	87,296
UPFC de 4 a 3	Potencia activa [MW]	28,346
	Potencia Reactiva [MVAR]	94,043
UPFC de 4 a 2	Potencia activa [MW]	24,51
	Potencia Reactiva [MVAR]	89,635
UPFC de 5 a 2	Potencia activa [MW]	26,724
	Potencia Reactiva [MVAR]	92,007
UPFC de 13 a 6	Potencia activa [MW]	28,739
	Potencia Reactiva [MVAR]	90,724

Fuente. Elaboración propia

Se puede observar que el UPFC tiene un mayor rendimiento para la mitigación de pérdidas de potencia cerca a los centros de generación (tabla 2). Para el caso de estudio, los nodos de generación son el 1 y 2 por lo que el dispositivo presenta un mejor rendimiento cuando está ubicado entre los nodos 1 a 2, 1 a 5 y 4 a 2.

En la figura 8 se observa el porcentaje de reducción de pérdidas de potencia activa respecto al caso base, según la ubicación del dispositivo FACTS. Adicionalmente, se aprecia que para la mitigación de pérdidas de potencia activa la ubicación adecuada del UPFC es entre los nodos 1 y 2.

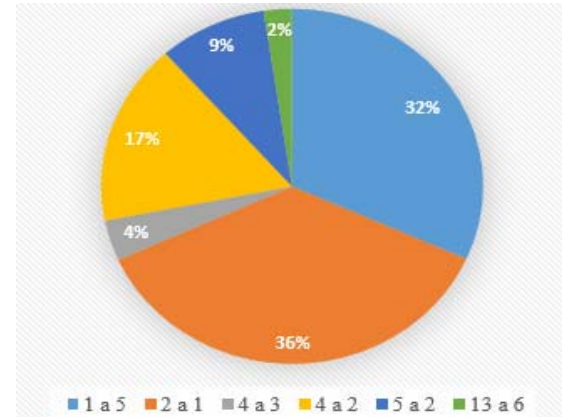


Figura 8. Reducción de pérdidas de potencia activa según la ubicación del UPFC. **Fuente.** Elaboración propia

En la figura 9 se ilustra el comportamiento global de la potencia para el caso base y para el caso donde el dispositivo presenta mejor rendimiento para la mitigación de pérdidas de potencia. Donde se reduce las pérdidas en 36% (10,886MW) de potencia activa y 4,6% (4,28 MVAR) de potencia reactiva.

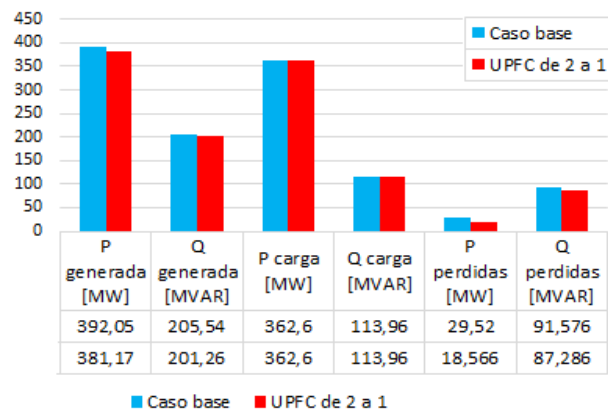


Figura 9. Comparación de potencia **Fuente.** Elaboración propia

5. CONCLUSIÓN

En este artículo se presentó el análisis de funcionamiento del UPFC en una red estándar IEEE 14 nodos. Los resultados de simulación muestran que el dispositivo FACTS presenta un buen rendimiento para mejorar la estabilidad de tensión del sistema, así como para reducir las pérdidas de potencia del mismo. Se muestra que con la ubicación adecuada del dispositivo se tiene control sobre el flujo de potencia, lo que permite mejorar los perfiles de tensión, aumento de cargabilidad de las líneas de transmisión y descongestión del sistema. La validación del caso de estudio se realizó con el toolbox de sistemas eléctricos de potencia PSAT.

6. REFERENCIAS

- [1] Yu Shiwen, Hou Hui, Wang Chengzhi, Geng Hao, Fan Hao, Review on Risk Assessment of Power System, *Procedia Computer Science*, Volume 109, 2017, Pages 1200-1205
- [2] H.O. Bansal, H.P. Agrawal, S. Tiwana, A.R. Singal, L. Shrivastava, Optimal location of FACT devices to control reactive power, *Int. J. Eng. Sci. Technol.* 2 (6) (2010) 1556–156
- [3] J. Aghaei, M. Gitizadeh, M. Kaji, "Placement and operation strategy of FACTS devices using optimal continuous power flow", *Scientia Iranica*, Volume 19, Issue 6, 2012, pp 1683-1690
- [4] A. Belyaev, V. Korovkin, S. Chudny and V. Frolov "Reduction of active power losses in electric power systems with optimal placement of FACTS devices," in *IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW)*, pp. 150-154, February 2015
- [5] M. A. Abido, "power system stability enhancement using FACTS controllers: a review," in *Arabian Journal for Science & Engineering*, vol. 34, no. 1B, pp. 153-173, April 2009.
- [6] J. Baskaran, V. Palanisamy, "Optimal location of FACTS devices in a power system solved by a hybrid approach, Nonlinear Analysis" in *Theory, Methods & Applications*, Volume 65, Issue 11, 2006, pp 2094-2102
- [7] A. E. Gurrola, J. Segundo-Ramírez and C. N. Gutiérrez, "Wide area control in electric power systems incorporating FACTS controllers: Review," 2014 *IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa, 2014, pp. 1-6.
- [8] N. Rawat, A. Bhatt and P. Aswal, "A review on optimal location of FACTS devices in AC transmission system," 2013 *International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC)*, Sri Rangalatchum Dindigul, 2013, pp. 104-109.
- [9] M. Singh, S. Gupta, "UPFC facts devices in power system to improve the voltage profile and enhancement of power transfer loadability," in *IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, vol. 7, no. 3, pp. 1-4, July 2016
- [10] M. Singh and S. Gupta, "UPFC facts devices in power system to improve the voltage profile and enhancement of power transfer loadability," 2016 *IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, Delhi, 2016, pp. 1-4
- [11] R. Tiwari, K. R. Niazi and V. Gupta, "Decoupled power exchange model of UPFC to enhance voltage stability margin of power systems," 2011 *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA, 2011, pp. 1-8.
- [12] Nabavi-Niaki and M.R. Lravani "Steady-state and dynamic models of unified power flow controller (UPFC) for power system studies" *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 4, pp. 1937-1943, 1996
- [13] I. Coronado, J. Ramírez, P. Zúñiga "Comparación de metodologías para la inclusión del UPFC en estudios de estado estacionario" *Congreso CIGRÉ*, 2001.
- [14] N. Zhang, J. Liu, Q. Zhou, H. Hu, C. Jing and H. An, "A review of different UPFC steady models in power flow algorithm," 2015 *5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, Changsha, 2015, pp. 2420-2424.
- [15] Jahani, R. "Optimal placement of unified power flow controller in power system using imperialist competitive algorithm," *Middle-East Journal of Scientific Research*, 2011, pp 999-1007
- [16] H.M. Ayres, I. Kopcak, M.S. Castro, F. Milano, V.F. da Costa, "A didactic procedure for designing power oscillation dampers of FACTS devices", *Simulation Modelling Practice and Theory*, Volume 18, Issue 6, 2010, pp 896-909.
- [17] S. Ammous, R. Ben Ammar, A. Oualha and H. H. Abdallah, "Wind power integration improvement in the electric network," 2015 *16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, Monastir, 2015, pp. 527-533.
- [18] Ferdrico Milano, "Power system Analysis Toolbox: Quick Reference Manual for PSAT", version 2.1.6 2008