

## Limit Resolution in the Decoupled UPFC Model for Power Flow

金 台 鉉\* · 徐 將 哲\*\* · 林 正 煜\*\* · 文 承 逸\*\*\* · 朴 鍾 根\*\*\* · 韓 炳 文§

(Tae-Hyun Kim · Jang-Cheol Seo · Jung-Uk Lim · Seung-Ill Moon · Jong-Keun Park · Byung-Moon Han)

**Abstract** - This paper presents new methods to resolve the important limits in the decoupled UPFC model for power flow, by which conventional power flow program can be performed with addition of two buses per one UPFC. In order to operate UPFC to the desired value, the series voltage and shunt current of UPFC should be computed. So a method of calculating these by simple equations after power flow is derived. However, the calculated magnitude of series voltage and/or shunt current of UPFC may not be allowed because of the UPFC limit due to the ratings of inverters. In this case, the active power and the reactive power (or the voltage magnitude) of UPFC buses should be revised to resolve the limit. This paper proposes the Newton Raphson method to resolve these limits. Particularly, when resolving the series voltage magnitude, three strategies are proposed according to the priority of the active power and the reactive power (or the voltage magnitude).

**Key Words** : Flexible AC Transmission Systems (FACTS), Unified Power Flow Controller (UPFC), Decoupled UPFC model for Power flow, Limit Resolution, Newton Raphson

### 1. 서 론

UPFC는 두 개의 인버터 즉, 유효전력과 무효전력을 제어하는 직렬 인버터와 전압 크기를 제어하는 병렬 인버터로 구성된 FACTS 기기로서 다른 여러 개의 FACTS 기기의 기능을 동시에 수행할 수 있다. 그러므로, UPFC의 인버터 정격값을 초과하지 않는 범위 내에서 세 가지의 파라미터를 조절하여 전력 시스템 운용을 우리가 원하는 바에 따라 최적화할 수 있다. UPFC의 정상 상태 모형은 직렬 인버터는 직렬 전압원으로, 병렬 인버터는 병렬 전류원으로 모형화할 수 있다[1]-[6].

UPFC가 있는 전력 계통에서 원하는 조류 상황을 유지하도록 UPFC를 제어하고 운용하기 위해서는 정상 상태 해석이 우선적으로 필요하다. 이를 위해서는 조류계산을 수행하여야 한다.

조류계산의 입력은 모선의 유효전력과 무효전력(또는 전압 크기)만으로 한정되어 있다. 그런데, UPFC의 정상 상태 모형에 있는 직렬 전압원의 크기와 위상은 한 모선의 값이 아니라 두 모선의 벡터 값의 차이이므로, 위 양들을 조류계산의 입력으로 지정할 수는 없으므로, 조류계산에서 이 모형을 그대로 사용할 수는 없다.

이 점을 극복한 조류계산을 위한 분리된 UPFC 모형이 제시되었다[6]-[8]. 이 방법은 UPFC가 동작함으로써 변화한 UPFC 모선의 유효전력과 무효전력(또는 전압 크기)값을 조류계산의 입력으로서 지정한 후, 조류계산 후에 직렬 전압원과 병렬 전류원의 크기와 위상을 구하는 방법이다. 이 방법에 의하면 1개의 UPFC당 2개의 모선만 추가하면, 기존의 조류계산 프로그램을 전혀 수정하지 않고도 UPFC가 있을 때의 조류계산을 수행할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다. 그 밖에 UPFC 모선을 PV(발전기) 또는 PQ(부하) 모선 중에 원하는 대로 지정할 수 있다는 장점도 있다. 따라서, 본 논문에서는 분리된 UPFC 모형을 이용하여 조류계산을 하였다.

아직까지는 분리된 UPFC 모형을 이용하여 조류계산을 한 후에 직렬 전압과 병렬 전류의 크기와 위상을 구하는 식이 유도되지 않았는데, 본 논문에서 유도하였다.

인버터와 변압기의 용량에 의한, UPFC의 직렬 전압과 병렬 전류의 크기에는 최대 값이 존재하며 본 논문에서는 이 값을 제한값이라고 정의하였다. 보통 UPFC는 지정한 유효전력과 무효전력(또는 전압 크기)을 유지하도록 운용되는데, 제한값을 초과하지 않다가 계통 상황이 바뀌어서 이 값을 유지하려면 제한값을 초과하여야 하는 경우가 발생할 수 있다. 이 경우 지정한 유효전력과 무효전력(또는 전압 크기)을 변경하여야 한다.

제한값에 대한 기존의 연구로는 UPFC가 있는 2모선 계통에서 제한값 문제의 해결책을 제시하였는데, 송전단과 수신단의 위상이 고정된 경우이므로 조류계산에 적용할 수는 없다는 단점이 있었고[9], 제한값을 초과한 경우에 전압 페이서 그림에 의해서 개념적으로 유효전력과 무효전력의 중요도에 따라 3가지 해결 방법을 제시한 연구도 있었으나[10], 두 논

\* 正 會 員 : 서울大 電氣工學部 博士

\*\* 正 會 員 : 서울大 電氣工學部 博士課程

\*\*\* 正 會 員 : 서울大 電氣工學部 教授 · 工博

§ 正 會 員 : 明知大 電氣情報制御工學部 副教授 · 工博

接受日字 : 1998년 10월 9일

最終完了 : 1999년 6월 4일

문 다 수정할 양을 구하는 체계적인 식을 유도하지는 않았다.

본 논문에서는 뉴턴 랩슨 방법을 사용하여 제한값을 초과한 변수(UPFC의 직렬 전압 그리고/또는 병렬 전류 크기)들이 제한값 이내가 되도록 UPFC 모선의 유효전력과 무효전력(또는 전압 크기)을 변화시키는 체계적인 식을 제시하였다. 이를 위하여 UPFC의 직렬 전압과 병렬 전류의 크기를 수식화하여 이를 UPFC 모선의 유효전력과 무효전력(또는 전압 크기)에 대해 미분하였다. 이 미분 값에 의해서 제한값을 초과한 변수가 제한값 이내로 되도록 UPFC 모선의 유효전력과 무효전력(또는 전압 크기)들의 변화량을 구하여 변화량만큼 현재의 값에 더하면 된다.

본 논문에서는 UPFC에서 제한값을 초과한 변수를 하나씩 순차적으로 해결하였으므로, 맞추어야 할 변수는 1개이고, 변화시킬 수 변수는 3개(1개의 유효전력과 2개의 무효전력)이므로, 제한값 이내가 되도록 UPFC 모선의 유효전력과 무효전력(또는 전압 크기)을 변화시키는 방법은 유일하지 않고, 여러 가지 경우가 가능하다. 특히 직렬 전압 크기의 제한값을 초과하였을 경우에는 3가지 운용 방침을 가정하여 이에 의해서 가능한 3가지 해결책을 제시하였다.

## 2. 조류계산을 위한 분리된 UPFC 모형

### 2.1 정상 상태 모형

UPFC는 직렬과 병렬 인버터로 구성되어 있는데, 본 논문에서는 직렬 인버터를 전압원으로 병렬 인버터는 전류원으로 모의하였다. 변압기의 리액턴스 값은 실제로 아주 작기 때문에 이를 무시하면 정상 상태에서 그림 1과 같이 UPFC를 나타낼 수 있다.

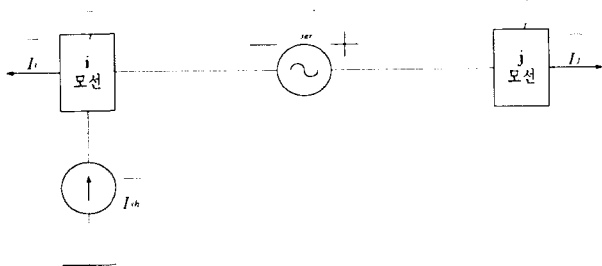


그림 1 UPFC의 정상 상태 모형

Fig. 1 The Steady-State UPFC model

### 2.2 조류계산을 위한 분리된 UPFC 모형

정상 상태에서의 UPFC를 해석하고 제어하기 위해서는 조류계산을 반드시 실행하여야 한다. 그런데 정상 상태의 모형을 이용하여 조류계산을 하려면, 병렬 전류원은 모선 전압을 곱하면 유효전력과 무효전력이 계산되므로 그 값을 지정하면 가능하나, 직렬 전압원은 두 모선의 전압과 위상을 지정하여야 하므로, 조류계산에서 입력으로 이용할 수 없어서 그 모형을 바로 적용할 수는 없으며, 조류계산을 위한 새로운 모형을 개발하여야 한다.

본 논문에서는 UPFC 1개당 2개의 모선만 추가하면 기존의 조류계산 프로그램을 수정하지 않고 사용할 수 있는 분리된 UPFC 모형을 사용하였으며, 이 모형의 기본 개념을 그림 2에 보였다.

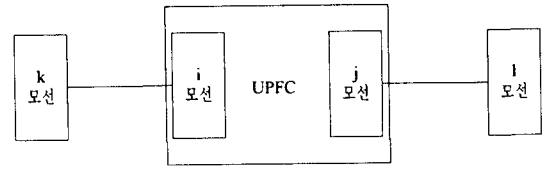


그림 2 분리된 UPFC 모형

Fig. 2 The Decoupled UPFC model

UPFC가 설치되어서 기존의 모선(k와 l) 사이에 2개의 모선(i와 j)이 새로이 추가된다고 가정하였다. 이 모형의 개념은 2개의 UPFC 모선(i와 j)에 값을 먼저 지정하여 조류계산을 한 후에 직렬 전압과 병렬 전류의 값을 계산하는 방법이다.

분리된 UPFC 모형에서 모선 값을 지정하는 방법은 다음과 같다.

우선, UPFC가 동작하지 않을 때의 값을 알기 위해서 UPFC가 설치될 위치에  $P=Q=0$ 인 PQ 모선인 여분의 모선을 설치하고 조류계산을 실시한다. 조류계산 결과를 통해 UPFC가 동작하지 않을 때의 값을 알 수 있으며 본 논문에서는 이 값을 아래 첨자 0을 붙여 식 (1)-(3)으로 나타내었다.

$$P_0 = -P_{i0} = P_{j0} \quad (1)$$

$$Q_0 = -Q_{i0} = Q_{j0} \quad (2)$$

$$V_0 = V_{i0} = V_{j0} \quad (3)$$

UPFC의 동작에 의해서 유효전력, 무효전력과 전압 크기가 변화한다. 그 중에서 유효전력의 경우는 UPFC가 이를 자체적으로 흡수하거나 생성할 수 없으므로 UPFC 양단 모선에서의 유효전력의 변화는 독립이 아니다. 본 논문에서 유효전력의 변화량  $dP$  를 식 (4)와 같이 정의한다.

$$dP = -dP_i = dP_j \quad (4)$$

결과적으로, UPFC가 동작한 후 UPFC 모선에서의 값은 UPFC가 동작하지 않았을 때의 값(아래 첨자 0)과 UPFC 동작시 변화량(접두사 d)의 합이며, 식 (5)-(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_i = P_{i0} + dP_i = -P_0 - dP \quad (5)$$

$$P_j = P_{j0} + dP_j = P_0 + dP \quad (6)$$

$$Q_i = Q_{i0} + dQ_i = -Q_0 + dQ_i \quad (7)$$

$$Q_j = Q_{j0} + dQ_j = Q_0 + dQ_j \quad (8)$$

$$V_i = V_0 + dV_i \quad (9)$$

$$V_j = V_0 + dV_j \quad (10)$$

위의 식들에서 보면 하나의 UPFC를 통해 3개의 모선 변수값 ( $dP$ , ( $dQ_i$  또는  $dV_i$ ), ( $dQ_j$  또는  $dV_j$ )) 을 변화시킬 수 있다는 사실을 알 수 있다.

### 2.3 UPFC의 직렬 전압과 병렬 전류의 계산

분리된 UPFC 모형에 의한 조류계산 결과를 통해 전압 ( $\vec{V}_i, \vec{V}_j$ )과 전류( $\vec{I}_i, \vec{I}_j$ )가 계산되면 UPFC의 직렬 전압과 병렬 전류의 크기와 위상( $\vec{V}_{ser}, \vec{I}_{sh}$ )은 식 (11)-(12)에 의해서 계산할 수 있다.

$$\vec{V}_{ser} = \vec{V}_j - \vec{V}_i \quad (11)$$

$$\vec{I}_{sh} = \vec{I}_i + \vec{I}_j \quad (12)$$

### 3. UPFC의 제한값 해결

UPFC의 직렬 전압과 병렬 전류(  $\vec{V}_{ser}, \vec{I}_{sh}$  )의 크기(  $V_{ser}, I_{sh}$  )는 식 (13)-(14)와 같이 UPFC를 구성하는 2개의 인버터의 정격 용량에 의한 제한값(  $V_{max}, I_{max}$  ) 이내로 결정되어야 한다.

$$V_{ser} \leq V_{max} \quad (13)$$

$$I_{sh} \leq I_{max} \quad (14)$$

만일 계산된 UPFC의 직렬 전압과 병렬 전류(  $\vec{V}_{ser}, \vec{I}_{sh}$  )의 크기(  $V_{ser}, I_{sh}$  )가 식 (13)과 식 (14)중 하나라도 만족하지 못한 경우에는 이를 만족시키도록 UPFC 모션 값(  $dP, (dQ_i \text{ 또는 } dV_i), (dQ_j \text{ 또는 } dV_j)$  )을 바꾸어야 한다.

아직까지 이 과정을 체계적으로 계산한 연구가 되어 있지 않았는데, 본 논문에서 뉴턴 랩슨 방법을 이용하여 그 과정을 제시하였으며 그림 3이 본 논문에서 제시한 해결 과정의 흐름도이며 그림 3의 '제한값 해결' 부분에서 본 논문에서 제시한 계산식을 이용하면 된다.

수정항(correction)은 우리가 지정할 수 있는 항으로서 UPFC 모션의 유효전력과 무효전력 또는 전압크기(  $dP, (dQ_i \text{ 또는 } dV_i), (dQ_j \text{ 또는 } dV_j)$  )를 의미하고, 불일치항(mismatch)은 맞추어야 하는 값으로서 직렬 전압 그리고/또는 병렬 전류 크기(  $V_{ser}, I_{sh}$  )를 의미한다. 조류계산 결과 제한값을 초과한 불일치항이 존재하면, 제한값 해결 과정을 1단계 수행하여 새로운 수정항의 변화량을 구하고, 그 값을 이용하여 다시 조류계산을 수행하여 제한값을 해결할 때까지 반복하는 방법이다. 수정항의 변화량을 구할 때는 제한값을 초과한 불일치항을 수정항으로 미분한 값과 불일치값(제한값을 초과한 변수의 현재 값과 제한값과의 차이)을 이용한다. 이 방법을 이용하면 불일치항의 값과 제한값과의 차이가 작아지며, 제한값과의 차이가 허용 오차보다 작아질 때까지 반복하면 된다.

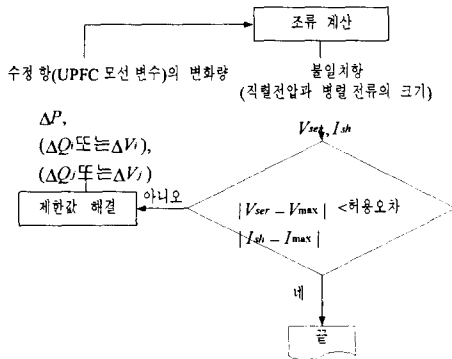


그림 3 제한값 해결 과정  
Fig. 3 Limit resolution process

UPFC는 유효전력을 발생하거나 흡수할 수 없기 때문에 i 모선과 j 모선의 유효전력 변화량의 합은 영이 된다. 따라서, i 모선과 j 모선에서의 유효전력의 변화량  $\Delta P_i$ 와  $\Delta P_j$ 는 식 (15)-(16)을 만족시켜야 한다.

$$P = -P_i = P_j \quad (15)$$

$$\Delta P = -\Delta P_i = \Delta P_j \quad (16)$$

UPFC의 직렬 전압과 병렬 전류의 크기를 UPFC 모션의 유효전력과 무효전력(또는 전압 크기)에 대해서 미분할 때  $\frac{\partial \theta_i}{\partial P_i}, \frac{\partial \theta_j}{\partial P_j}, \frac{\partial V_i}{\partial Q_i}, \frac{\partial V_j}{\partial Q_j}$ 가 필요한데, 이 식들은 조류계산 Jacobian의 역 행렬에서 구하였으며, 그 이외의 변수들간의 관계는 상대적으로 작으므로 무시하였다.

#### 3.1 직렬 전압 크기 제한값 초과

이 경우는 식 (13)을 만족하지 않고 식 (17)을 만족한다.

$$V_{ser} > V_{max} \quad (17)$$

##### 3.1.1 계산식

직렬 전압원의 크기(  $V_{ser}$  )는 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{ser}^2 = V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j\cos(\theta_j - \theta_i) \quad (18)$$

불일치항의 변화량(  $\Delta P, \Delta Q_i, \Delta Q_j, \Delta V_i, \Delta V_j$  )을 구하기 위해서 식 (18)을 UPFC의 모션 변수(  $P, Q_i, Q_j, V_i, V_j$  )에 대해서 미분하면 식 (19)-(23)과 같다.

$$V_{ser} \frac{\partial V_{ser}}{\partial P} = V_{ser} \frac{\partial V_{ser}}{\partial(\theta_j - \theta_i)} \frac{\partial(\theta_j - \theta_i)}{\partial P} = V_iV_j\sin(\theta_j - \theta_i) \left( \frac{\partial \theta_i}{\partial P_i} + \frac{\partial \theta_j}{\partial P_j} \right) \quad (19)$$

$$V_{ser} \frac{dV_{ser}}{dQ_i} = V_{ser} \frac{\partial V_{ser}}{\partial V_i} \frac{\partial V_i}{\partial Q_i} = (V_i - V_j\cos(\theta_j - \theta_i)) \frac{\partial V_i}{\partial Q_i} \quad (20)$$

$$V_{ser} \frac{dV_{ser}}{dQ_j} = V_{ser} \frac{\partial V_{ser}}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial Q_j} = (V_j - V_i\cos(\theta_j - \theta_i)) \frac{\partial V_j}{\partial Q_j} \quad (21)$$

$$V_{ser} \frac{\partial V_{ser}}{\partial V_i} = V_i - V_j\cos(\theta_j - \theta_i) \quad (22)$$

$$V_{ser} \frac{\partial V_{ser}}{\partial V_j} = V_j - V_i\cos(\theta_j - \theta_i) \quad (23)$$

계산된 Jacobian에 의해서 불일치항(  $\Delta V_{ser}$  )과 수정항(  $\Delta V_i, \Delta V_j, \Delta P$  )의 관계는 식 (24)-(25)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{ser} \Delta V_{ser} = V_{ser} \left[ \frac{\partial V_{ser}}{\partial Q_i} \frac{\partial V_{ser}}{\partial Q_j} \frac{\partial V_{ser}}{\partial P} \right] \begin{bmatrix} \Delta Q_i \\ \Delta Q_j \\ \Delta P \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$V_{ser} \Delta V_{ser} = V_{ser} \left[ \frac{\partial V_{ser}}{\partial V_i} \frac{\partial V_{ser}}{\partial V_j} \frac{\partial V_{ser}}{\partial P} \right] \begin{bmatrix} \Delta V_i \\ \Delta V_j \\ \Delta P \end{bmatrix} \quad (25)$$

식 (24)-(25)에 의해서 불일치항으로부터 수정항을 구할 수 있다. 구하여야 하는 변수인 수정항은 3개인데 반하여 주어진 변수인 불일치항은 1개밖에 없으므로, 관계식이 2개 더 있어야만 유일하게 수정항을 구할 수 있다. 본 논문에서는 이 관계식을 유효 전력과 무효 전력(또는 전압 크기)의 상대적인 중요도에 의하여, 실제적으로 의미가 있는 3가지 운용 방침을 제시하였다.

3.1.2 운용 방침에 의한 3가지 해결 방법

여러 가지 가능한 수정항의 값 중에서, 의미가 있는 경우를 구하기 위하여, 유효 전력과 무효 전력(또는 전압 크기)의 상대적인 중요도에 의한 3가지 운용 방침을 제시하였다. 무효전력(또는 전압크기)은 2개의 모선에서 독립이므로, 더 많은 경우가 가능하나 이들의 중요도가 다른 경우는 실제로 별로 없으므로, 2개의 수정항( $\Delta V_i, \Delta V_j$ )의 중요도는 같다고 가정하고 2종류의 변수 ( $\Delta V, \Delta P$ )의 중요도에 따라서 필요한 2개의 관계식을 구하는 3가지 방법을 제시하였다. 만일  $\Delta V_i$ 와  $\Delta V_j$ 의 중요도가 다르다고 하더라도 본 논문에서 제안한 방법을 약간 수정하여 적용하면 된다. 결론적으로 생각할 수 있는 경우는 유효전력( $\Delta P$ )과 전압크기( $\Delta V$ )의 중요도가 같은 경우, 유효전력( $\Delta P$ )이 전압 크기( $\Delta V$ )보다 중요한 경우, 전압크기( $\Delta V$ )가 유효전력( $\Delta P$ )보다 중요한 경우의 3가지이다.

그림 4 (a)와 (b)에서 3가지 경우에 대한 전압 벡터도를 나타내었다.

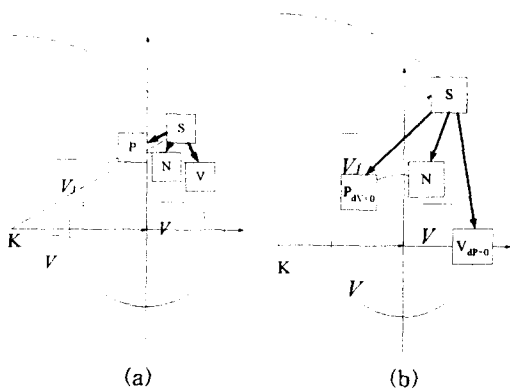


그림 4 전압 벡터도  
Fig. 4 The voltage diagram

UPFC의 동작은 인버터 정격에 의한 직렬 전압의 크기의 제약 때문에 원점을 중심으로 하는 원 내부만 허용된다. 만일 원하는 점 S가 그림 4 (a)와 (b)에서와 같이 원 외부에 있다면 그 점에서 UPFC의 동작은 사실상 불가능하므로, 원 주 상에 있는 점으로 동작점을 옮겨야만 한다. 원 주 상의 점들은 그림 4 (a)에서는 N, P, V 이고, 그림 4 (b)에서는 N,  $P_{dP=0}$ ,  $V_{dP=0}$  이다. 물론 원 주 상에 있는 다른 점을 동작점으로 하여 UPFC를 운전할 수 있지만 실제적으로 의미는 없다.

그림 4 (a)와 (b)의 차이는 제한값 해결을 위하여 계산하여야 할 식과 수정하여야 할 변수가 다르기 때문이다.  $\vec{V}_i$ 와  $\vec{V}_j$ 의 위상각의 차이는  $dP$ 에 비례하며,  $\vec{V}_i$ 와  $\vec{V}_j$ 의 크기의 차이는  $dV$ 에 비례한다.

점 K와 점 S를 연결하는 선분이, 원점을 중심으로 하는 원과 만난 경우가 그림 4 (a)의 점 P이고, 원점을 중심으로 하는 원과 만나지 않는 경우가 그림 4 (b)의 점  $P_{dP=0}$ 이다.

그림 4 (a)에서 점 S에서 점 P로 옮기려면  $dV$ 만 감소시키면 되며, 그림 4 (b)에서 점 S에서 점  $P_{dP=0}$ 로 이동시키려면,  $dV$ 의 감소만으로는 부족하기 때문에,  $dP$ 도 감소시켜야 한다.

점 K를 중심으로 하고 점 S를 지나는 원이, 원점을 중심으로 하는 원과 만난 경우가 그림 4 (a)의 점 V이고, 원점을 중심으로 하는 원과 만나지 않는 경우가 그림 4 (b)의 점  $V_{dP=0}$ 이다. 그림 4 (a)에서 점 S에서 점 V로 옮기려면  $dP$ 만 감소시키면 되며, 그림 4 (b)에서 점 S에서 점  $V_{dP=0}$ 로 이동시키려면,  $dP$ 의 감소만으로는 부족하기 때문에,  $dV$ 도 감소시켜야 한다.

그림 4에 대한 설명으로 제시된 표 1을 참조하면 '제약 조건' 열에 있는 식을 추가함으로써 유일하게 수정항 ( $\Delta V_i, \Delta V_j, \Delta P$ )을 구할 수 있음을 알 수 있다. 중요도가 다를 경우의 기본적인 원칙은 중요도가 낮은 변수를 우선 변화시키고, 이를 최대한 변화시켜도 제한값에 도달하지 못하면, 그 다음에 중요도가 높은 변수를 변화시키는 것이다.

표 1 직렬 전압 크기 ( $V_{ser}$ ) 제한을 해결하기 위한 3가지 방법

Table 1 Three strategies to resolve series voltage magnitude ( $V_{ser}$ )

중요 변수	경우	그림4 기호	제약 조건
없음		(a) N (b) N	$\frac{\Delta V_i}{dV_0} = \frac{\Delta V_j}{dV_0} = \frac{\Delta P}{dP_0}$
유효 전력	$dV_i = dV_j = (dV_0 + dV_R)/2$	$V_{ser} \leq V_{max}$ (a) P	$dP = 0$ $\frac{\Delta V_i}{dV_0} = \frac{\Delta V_j}{dV_0}$
	일 때	$V_{ser} > V_{max}$ (b) $P_{V0}$	$dV_i = dV_j = (dV_0 + dV_R)/2$
전압 크기	$dP = 0$	$V_{ser} \leq V_{max}$ (a) V	$\Delta V_i = \Delta V_j = 0$
	일 때	$V_{ser} > V_{max}$ (b) $V_{R0}$	$\frac{\Delta V_i}{dV_0} = \frac{\Delta V_j}{dV_0}$ $dP = 0$

3.2 병렬 전류 크기 제한값 초과

이 경우는 식 (14)을 만족하지 않고 식 (26)을 만족하는 경우이다.

$$I_{sh} > I_{max} \tag{26}$$

UPFC 모선 전류  $\vec{I}_i$ 와  $\vec{I}_j$ 는 식 (27), (28)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{I}_i = I_{ip} + I_{iq} = \left( \frac{S_i}{\vec{V}_i} \right)^* = \left( \frac{P_i + jQ_i}{\vec{V}_i} \right)^* \tag{27}$$

$$\vec{I}_j = I_{jp} + I_{jq} = \left( \frac{S_j}{\vec{V}_j} \right)^* = \left( \frac{P_j + jQ_j}{\vec{V}_j} \right)^* \tag{28}$$

병렬 전류( $\vec{I}_{sh}$ )는 식 (27)과 식 (28)의 합이므로 식 (29)와 같이 나타낼 수 있으며, 병렬 전류의 크기( $I_{sh}$ )는 식 (30)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{I}_{sh} = I_{shp} + jI_{shq} = (I_{ip} + I_{jp}) + j(I_{iq} + I_{jq}) \quad (29)$$

$$I_{sh}^2 = I_{shp}^2 + I_{shq}^2 = (I_{ip} + I_{jp})^2 + (I_{iq} + I_{jq})^2 \quad (30)$$

수정량의 변화량( $\Delta P, \Delta Q_i, \Delta Q_j, \Delta V_i, \Delta V_j$ )을 구하기 위해서 식 (30)을  $P, Q_i, Q_j, V_i, V_j$ 에 대해서 미분하면 식 (31)-(35)과 같다.

$$I_{sh} \frac{dI_{sh}}{dP} = \text{Re} \left( \vec{I}_{sh} \left( \frac{-1}{V_i} + \frac{1}{V_j} \right) \right) + \text{Im} \left( \vec{I}_{sh} \left( \vec{I}_i \frac{\partial \theta_i}{\partial P_i} - \vec{I}_j \frac{\partial \theta_j}{\partial P_j} \right) \right) \quad (31)$$

$$I_{sh} \frac{\partial I_{sh}}{\partial Q_i} = -\text{Im} \left( \frac{\vec{I}_{sh}}{V_i} \right) \quad (32)$$

$$I_{sh} \frac{\partial I_{sh}}{\partial Q_j} = -\text{Im} \left( \frac{\vec{I}_{sh}}{V_j} \right) \quad (33)$$

$$I_{sh} \frac{dI_{sh}}{dV_i} = -\text{Im} \left( \frac{\vec{I}_{sh}}{V_i} / \frac{\partial V_i}{\partial Q_i} \right) \quad (34)$$

$$I_{sh} \frac{dI_{sh}}{dV_j} = -\text{Im} \left( \frac{\vec{I}_{sh}}{V_j} / \frac{\partial V_j}{\partial Q_j} \right) \quad (35)$$

대부분의 경우 병렬 전류의 크기를 유효전력에 대해서 미분한 식 (31)의 값은 무효전력과 전압 크기에 대해서 미분한 식 (32)-(35)에 비하여 아주 작은 값을 갖는다. 이는 병렬 전류의 크기가 주로 유효전력과 관계 있고, 무효전력과는 거의 무관하다는 사실을 의미한다. 그러므로, 만일 유효전력을 변화시키므로써 이 제한값을 해결하려면 실제적으로 거의 불가능하기 때문에, 본 논문에서는 유효전력에 의한 병렬 전류의 영향은 무시하고 무효전력(또는 전압 크기)만을 변화시켜서 이 제한값을 해결하였다.

유효전력의 변화가 없다고 가정하면 불일치항과 수정량의 관계는 식 (36)-(37)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{sh} \Delta I_{sh} = I_{sh} \begin{bmatrix} \frac{\partial I_{sh}}{\partial Q_i} & \frac{\partial I_{sh}}{\partial Q_j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_i \\ \Delta Q_j \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$I_{sh} \Delta I_{sh} = I_{sh} \begin{bmatrix} \frac{\partial I_{sh}}{\partial V_i} & \frac{\partial I_{sh}}{\partial V_j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_i \\ \Delta V_j \end{bmatrix} \quad (37)$$

i 모선과 j 모선이 PQ(부하) 모선인 경우  $Q_i$ 와  $Q_j$ 의 중요도가 같다고 가정하면, 식 (38)이 추가되고 결국 제한값에 도달하는 방법이 유일하게 결정되어  $\Delta Q_i$ 와  $\Delta Q_j$ 의 값을 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta Q_i}{dQ_i} = \frac{\Delta Q_j}{dQ_j} \quad (38)$$

i 모선과 j 모선이 PV(발전기) 모선인 경우  $V_i$ 와  $V_j$ 의 중요도가 같다고 가정하면, 식 (39)가 추가되고 결국 제한값에 도달하는 방법이 유일하게 결정되어  $\Delta V_i$ 와  $\Delta V_j$ 의 값을 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta V_i}{dV_i} = \frac{\Delta V_j}{dV_j} \quad (39)$$

### 3.3 직렬 전압 크기와 병렬 전류 크기 제한값 모두 초과

직렬 전압 크기와 병렬 전류 크기가 식 (13)-(14)을 모두 위배하고 식 (17)과 식 (26)을 만족하는 경우이다.

이 경우 해결 방법은 2단계로 나누어진다. 첫 번째 단계에서 병렬 전류의 크기를 먼저 해결한다. 그 후에 두 번째 단계에서 직렬 전압의 크기를 해결한다. 병렬 전류의 크기를 먼저 해결하는 이유는 계산이 더 쉽기 때문이다. 첫 번째 단계에서 병렬 전류의 크기를 해결한 후의 상태에서 직렬 전압의 크기가 제한값 내로 들어오면 두 번째 단계는 필요 없게 된다.

## 4 사례 연구

UPFC의 제한값 문제 해결 방법에 대한 수치 예제로서 그림 5에서 제시한 5모선 예제 계통[11]에 본 논문에서 제안한 방법을 적용하였다.

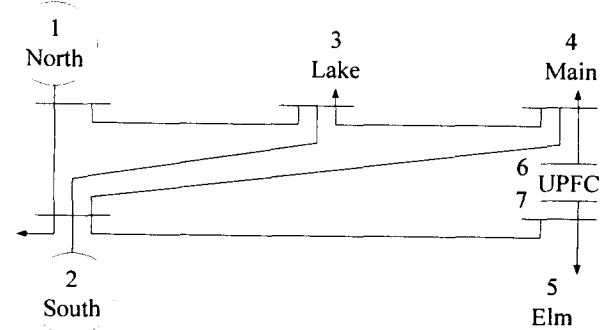


그림 5 예제 계통  
Fig. 5 A sample system

그림 5에서 알 수 있듯이 4번 모선과 5번 모선 사이에 UPFC가 설치되어 있고, 앞에서 제안한 분리된 조류계산을 위해서 6번 모선과 7번 모선이 새로이 추가되었으며, 모선 사이의 임피던스는 식 (40), (41)과 같이 두 개로 분리되었다.

$$Z_{46} = 0.06 + j0.18 \quad (40)$$

$$Z_{57} = 0.02 + j0.06 \quad (41)$$

UPFC가 동작하지 않을 때의 모선에서의 유효전력, 무효전력과 전압 크기를 표 2에 나타내었다.

표 2 UPFC가 동작하지 않을 때의 모선의 상태  
Table 2 States of buses when UPFC does not operate

	$P_0$	$Q_0$	$V_0$
모선 6	-0.631	-0.0026	1.0194
모선 7	0.631	0.0026	1.0194

직렬 전압 크기와 병렬 전류 크기에 대한 제한값은 식 (42), (43)과 같이 가정하였다.

$$V_{\max} = 0.16 \quad (42)$$

$$I_{\max} = 0.8 \quad (43)$$

제한값을 초과한 예로서 8가지 사례를 선정하여 표 3에 나타내었다.

표 3 제한 값 초과 사례

Table 3 Limit violation cases

사 례	모선 종류	$dP$	$dV_6$	$dQ_6$	$dV_7$	$dQ_7$	제한값 초과	$V_{ser}$	$I_{sh}$
1	PV	-0.3	0.07		-0.08		$V_{ser}$	0.1792	
2	PV	-0.4	0.08		-0.09		$V_{ser}$	0.1934	
3	PQ	0.3		-0.3		0.4	$V_{ser}$	0.2223	
4	PQ	-0.4		0.5		-0.4	$V_{ser}$	0.2786	
5	PV	-0.2	0.06		0.12		$I_{sh}$		0.8934
6	PQ	0.2		0.2		0.9	$I_{sh}$		0.9465
7	PV	-0.3	0.06		0.12		$V_{ser}$ $I_{sh}$	0.1753	0.8857
8	PQ	0.3		0.9		0.2	$V_{ser}$ $I_{sh}$	0.2142	0.8921

표 4-14에서 보는 바와 같이 5번 이내의 반복에서 제한값과  $10^{-5}$ 의 오차 범위 내로 수렴한다.

직렬 전압의 제한값을 해결할 경우에는 운용 방침에 의해서  $N$ , ( $P$  또는  $P_{dV=0}$ ), ( $V$  또는  $V_{dP=0}$ )의 3가지의 해결책이 존재하고, 병렬 전류의 경우에는 한가지 해결책만이 존재한다.

사례 1,2,3,4,7,8(표 4,5,6,7,11,13)에서 직렬 전압 제한값 해결의 경우 운용 방침 칸에서 'P 또는  $P_{dV=0}$ ?' 줄은 P에 속하는지  $P_{dV=0}$ 에 속하는지 판단하기 위한 예비 과정이고, 'V 또는  $V_{dP=0}$ ?' 줄은 V에 속하는지  $V_{dP=0}$ 에 속하는지 판단하기 위한 예비 과정이다. 'P 또는  $P_{dV=0}$ ?' 줄에서  $V_i = V_j$ 로 놓고 계산한  $V_{ser}$  값이 사례 1,3,7,8(표 4,6,11,13)에서는 제한값  $V_{max}$ 보다 작으므로 P에 속하며, 사례 2,4(표 5,7)에서는 제한값  $V_{max}$ 보다 크므로  $P_{dV=0}$ 에 속한다. 마찬가지로, 'V 또는  $V_{dP=0}$ ?' 줄에서  $dP=0$ 로 놓고 계산한  $V_{ser}$  값이, 사례 1,3,7,8(표 4,6,11,13)에서는 제한값  $V_{max}$ 보다 작으므로 V에 속하며, 사례 2,4(표 5,7)에서는 제한값  $V_{max}$ 보다 크므로  $V_{dP=0}$ 에 속한다.

4.1 직렬 전압 크기 제한값 초과

표 3에서 사례 1-4가 이 경우이며, 표 4-7에서 3가지 운용 방침에 의한 해결책이 제시되어 있다.

표 4 사례 1에서 직렬 전압 크기 ( $V_{ser}$ ) 제한값 해결

Table 4 Series voltage magnitude ( $V_{ser}$ ) limit resolution in case 1

운용 방침	$dP$	$dV_6$	$dV_7$	$V_{ser}$
사례 1	-0.3	0.07	-0.08	0.17917
$N$	-0.2679	0.0625	-0.0714	0.16000
$P$ 또는 $P_{dV=0}$	-0.3	-0.005	-0.005	0.14293
$P$	-0.3	0.0554	-0.0634	0.16000
$V$ 또는 $V_{dP=0}$ ?	0	0.07	-0.08	0.15624
$V$	-0.2104	0.07	-0.08	0.16000

표 5 사례 2에서 직렬 전압 크기 ( $V_{ser}$ ) 제한값 해결

Table 5 Series voltage magnitude ( $V_{ser}$ ) limit resolution in case 2

운용 방침	$dP$	$dV_6$	$dV_7$	$V_{ser}$
사례 2	-0.4	0.08	-0.09	0.21976
$N$	-0.291	0.0582	-0.0655	0.16000
$P$ 또는 $P_{dV=0}$ ?	-0.4	-0.005	-0.005	0.19041
$P_{dV=0}$	-0.3359	-0.005	-0.005	0.16000
$V$ 또는 $V_{dP=0}$ ?	0	0.08	-0.09	0.17705
$V_{dP=0}$	0	0.0723	-0.0831	0.16000

표 6 사례 3에서 직렬 전압 크기 ( $V_{ser}$ ) 제한 값 해결

Table 6 Series voltage magnitude ( $V_{ser}$ ) limit resolution in case 3

운용 방침	$dP$	$dQ_6$	$dQ_7$	$V_{ser}$
사례 3	0.3	-0.3	0.4	0.2223
$N$	0.2193	-0.2193	0.2925	0.1600
$P$ 또는 $P_{dV=0}$ ?	0.3	0.05	0.05	0.1390
$P$	0.3	-0.1237	0.1690	0.1600
$V$ 또는 $V_{dP=0}$ ?	0	-0.3	0.4	0.1567
$V$	-0.0962	-0.3	0.4	0.1600

표 7 사례 4에서 직렬 전압 크기 ( $V_{ser}$ ) 제한 값 해결

Table 7 Series voltage magnitude ( $V_{ser}$ ) limit resolution in case 4

운용 방침	$dP$	$dQ_6$	$dQ_7$	$V_{ser}$
사례 4	-0.4	0.5	-0.4	0.2786
$N$	-0.2289	0.2861	-0.2289	0.1600
$P$ 또는 $P_{dV=0}$ ?	-0.4	0.05	-0.05	0.1826
$P_{dV=0}$	-0.3502	0.05	-0.05	0.1600
$V$ 또는 $V_{dP=0}$ ?	0	0.5	-0.4	0.1999
$V_{dP=0}$	0	0.3984	-0.3187	0.1600

4.2 병렬 전류 크기 제한값 초과

표 4의 사례 5와 6이 이 경우이다. 유효전력은 변화하지 않으므로 오직 한 가지 해결책만이 존재한다. 반복 과정을 참고로 보였다.

표 8 사례 5에서 병렬 전류 크기( $I_{sh}$ ) 제한값 해결

Table 8 Shunt current magnitude ( $I_{sh}$ ) limit resolution in case 5

	$dP$	$dQ_6$	$dQ_7$	$I_{sh}$
사례 5	0.2	0.2	0.9	0.9465
반복 과정	0.2	0.1695	0.7625	0.8106
"	0.2	0.1673	0.7527	0.8008
"	0.2	0.1671	0.7520	0.8001
해결책	0.2	0.1671	0.7519	0.8000

표 9 사례 6에서 병렬 전류 크기( $I_{sh}$ ) 제한값 해결

Table 9 Shunt current magnitude ( $I_{sh}$ ) limit resolution in case 6

	$dP$	$dQ_6$	$dQ_7$	$I_{sh}$
사례 6	-0.2	0.06	0.12	0.8980
반복 과정	-0.2	0.0547	0.1094	0.8180
"	-0.2	0.0537	0.1074	0.8031
"	-0.2	0.0535	0.1071	0.8005
해결책	-0.2	0.0535	0.1070	0.8000

4.3 직렬 전압 크기와 병렬 전류 크기 제한값 모두 초과

표 4의 사례 7과 8이 이 경우이다. 두 사례 모두 병렬 전류 크기의 제한값을 해결하는 1단계 결과 직렬 전압 크기가 해결되지 않았으므로 직렬 전압 크기 제한값을 해결하는 2단계까지 수행하여야 한다. 표 10과 12가 1단계이고, 표 11과 표 13이 2단계이다.

표 10 사례 7에서 병렬 전류 크기 ( $I_{sh}$ ) 제한값 해결 (제1단계)

Table 10 Shunt current magnitude ( $I_{sh}$ ) limit resolution in case 7 (The first stage)

	$dP$	$dQ_6$	$dQ_7$	제한값 초과	$V_{ser}$	$I_{sh}$
사례 7	0.3	0.9	0.2	$V_{ser}, I_{sh}$	0.2145	0.8939
해결책	0.3	0.7990	0.1776	$V_{ser}$	0.2021	0.8000

표 11 사례 7에서 직렬 전압 크기 ( $V_{ser}$ ) 제한값 해결 (제2단계)

Table 11 Series voltage magnitude ( $V_{ser}$ ) limit resolution in case 7 (The second stage)

운용 방침	$dP$	$dQ_6$	$dQ_7$	$V_{ser}$	$I_{sh}$
표 11 결과	0.3	0.7990	0.1776	0.2021	0.8000
$N$	0.2344	0.6244	0.1387	0.1600	0.6463
$P$ 또는 $P_{dV=0?}$	0.3	0.4883	0.4883	0.1423	0.8384
$P$	0.3	0.4266	0.0948	0.1600	0.4322
$V$ 또는 $V_{dP=0?}$	0	0.7990	0.1776	0.1487	0.8398
$V$	0.1292	0.7990	0.1776	0.1600	0.8303

표 12 사례 8에서 병렬 전류 크기 ( $I_{sh}$ ) 제한값 해결 (제1단계)

Table 12 Shunt current magnitude ( $I_{sh}$ ) limit resolution in case 8 (The first stage)

	$dP$	$dV_6$	$dV_7$	제한값 초과	$V_{ser}$	$I_{sh}$
사례 8	-0.3	0.06	0.12	$V_{ser}, I_{sh}$	0.1753	0.8857
해결책	-0.3	0.0543	0.1085	$V_{ser}$	0.1712	0.8000

표 13 사례 8에서 직렬 전압 크기 ( $V_{ser}$ ) 제한값 해결 (제2단계)

Table 13 Series voltage magnitude ( $V_{ser}$ ) limit resolution in case 8 (The second stage)

운용 방침	$dP$	$dV_6$	$dV_7$	$V_{ser}$	$I_{sh}$
표 13 결과	-0.3	0.0543	0.1085	0.1712	0.8000
$N$	-0.2807	0.0508	0.1016	0.1600	0.7494
$P$ 또는 $P_{dV=0?}$	-0.3	0.0814	0.0814	0.1441	0.7588
$P$	-0.3	0.0367	0.0735	0.1600	0.5381
$V$ 또는 $V_{dP=0?}$	0	0.0543	0.1085	0.0570	0.8118
$V$	-0.2754	0.0543	0.1085	0.1600	0.8022

표 10과 표 12에서 직렬 전압 크기의 제한값을 해결하는 2 단계 결과, 운용 방침  $V$ 의 경우에는, 병렬 전류 크기의 제한값이 해결되지 않았으므로 해결책이 존재하지 않는다.

5. 결론

본 논문에서는 기존의 조류계산 프로그램을 그대로 이용할 수 있는 큰 장점을 가진 분리된 UPFC 모형을 이용하여, UPFC가 있는 전력 시스템에 대한 조류계산을 수행하였다. 조류계산 후 UPFC의 직렬 전압과 병렬 전류를 구하는 방정식을 유도하였다. 계산된 값이 UPFC의 정격으로 인한 2가지의 제한값(직렬 전압 크기와 병렬 전류 크기)을 초과하였을 경우, 뉴턴 랩스 방법을 이용하여, 제한값을 초과한 UPFC 모선의 직렬 전압 크기 그리고/또는 병렬 전류 크기가 제한값 이내가 되도록 UPFC의 모선의 유효전력과 무효전력(또는 전압 크기)을 구하는 체계적인 방법을 제시하였다. 5모선 계통을 대상으로 하여 제안한 방법을 적용하여 UPFC 모선의 유효전력과 무효전력(또는 전압 크기)을 수정하여 제한값을 초과한 변수의 값이 제한값에 수렴함을 보임으로서 그 타당성을 검증하였다.

본 논문에서 제시한 방법에 의해서, UPFC가 있는 전력 계통을 분리된 모형을 이용하여 조류계산을 수행할 수 있다. UPFC의 직렬 전압과 병렬 전류 크기의 제한값 해결에 의해서 UPFC의 운전 영역을 알 수 있으며, 이에 의해서 UPFC의 위치 및 용량 선정에도 이용할 수 있다.

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 자유공모과제 연구비에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] L. Gyugui, C. D. Schauder, S. L. Williams, T. R. Rietman, D. R. Torgerson and A. Edris, "The Unified Power Flow Controller : A new approach to power transmission control," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 10, no. 2, April 1995, pp. 1085-1093.
- [2] R. Mihalic and P. Zunko, "Improvement of Transient Stability Using UPFC", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 11, no. 1, January 1996
- [3] K. S. Smith, L. Ran and J. Penman, "Dynamic modelling of a Unified Power Flow Controller", IEE Proc. C Generation, Transmission and Distribution, Vol. 144, No. 1, Jan. 1997, pp 7-12
- [4] S. Limyingcharoen, U. D. Annakage and N. C. Paalawaththa, "Effects of UPFC on transient stability", IEE Proc.-C Gener. Transm. Distrib., Vol. 145, No. 2, Mar. 1998, pp 182-188
- [5] K. K. Sen and E. J. Stacey, "UPFC : Theory, Modeling, and Applications", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 13, No. 4, Oct. 1998, pp 1453-1460
- [6] Tae-Hyun Kim, Jang-Cheol Seo, Jung-Uk Lim, Seung-Il Moon, Jong-Keun Park and Byung-Moon Han, "A decoupled UPFC Model for power flow considering limit resolution," IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Feb. 1999, pp 1190-1195
- [7] A. Nabavi-Niaki, M. R. Iravani, "Steady-State and Dynamic Models of UPFC for Power System Studies" IEEE Trans on PWRD, Vol. 11, No. 4, Nov. 1996, pp 1937-1943
- [8] Douglas J. Gotham and G.T. Heydt, "Power flow control and power flow studies for systems with FACTS devices", IEEE Trans. Power Systems, vol. 13, no. 1, February 1998, pp. 60-65
- [9] J. Bian, D. G. Ramey, R. J. Nelson and A. Edris, "A study of equipment sizes and constraints for a Unified Power Flow Controller," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 12, no. 3, July 1997, 1385-1391.
- [10] C. D. Schauder, L. Gyugui, M. R. Lund, D. M. Hamai, T. R. Rietman, D. R. Torgerson and A. Edris, "Operation of the Unified Power Flow Controller under practical constraints," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 13, no. 2, April 1998, pp 630-637.
- [11] Stagg and El-Abiad, "Computer Methods in Power System Analysis" McGraw-Hill, 1968. p. 284.

저 자 소 개



**김 태 현 (金台鉉)**

1963년 6월 18일생. 1986년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학부 졸업(박사)  
 Tel : 02-880-7990, H·P : 011-215-6484  
 E-mail : kith@plaza1.snu.ac.kr



**서 장 철 (徐將哲)**

1969년 12월 25일생. 1993년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 1999년 현재 동 대학원 전기공학부 박사과정.  
 Tel : 02-880-7258  
 E-mail : bulbong@netian.com



**임 정 옥 (林正煜)**

1970년 9월 27일생. 1996년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 서울대 대학원 전기공학부 졸업(석사). 1999년 현재 동 대학원 전기공학부 박사과정  
 Tel : 02-880-7258  
 E-mail : julim@powerlab.snu.ac.kr



**문 승 일 (文承逸)**

1961년 2월 1일생. 1985년 서울대 전기공학과 졸업. 1989년 오하이오 주립대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993년~1997년 전북대 전기공학과 조교수. 1997년~현재 서울

대 공대 전기공학부 조교수

Tel : 02-880-1821

E-mail : moonsi@plaza.snu.ac.kr

**박 종 근 (朴鍾根)**

전기학회 논문지 제48권 제5호 참조

Tel : 02-880-7247

E-mail : parkjk@plaza.snu.ac.kr

**한 병 문 (韓炳文)**

전기학회 논문지 제48권 제5호 참조

Tel : 0335-330-6366

E-mail : erichan@wh.myongji.ac.kr