

한전 계통에서의 무효전력 부하 평가에 관한 연구

윤종수\*, 원종률, 윤용범, 장병훈, 이기선, 추진부  
 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 계통안정화그룹

Reactive Power Loadability in Korean Power System

Jong-Su Yoon, Jong-Ryul Won, Yong-Beum Yoon, Byung-Hoon Jang, Ki-Sun Lee, Jin-Boo Choo  
 Power System Lab., Korea Electric Power Research Institute, KEPCO

**Abstract** - This paper proposes the estimation method about how much reactive power can be increased or decreased under prescribed bus voltage limits in non-linear reactive power and power flow equations. The static nonlinear reactive power voltage problem can be formulated using a linear resistive(I-V) network with voltage dependent current sources. Linear programming model is derived for finding bounds on reactive power. This method was applied to future Korean power system and proved its effectiveness.

1. 서 론

전력시장에서의 경쟁체제 도입으로 인하여 전력회사 입장에서 기존 전력설비의 이용률 향상을 통한 전력 수송력 증대는 설비투자에 미치는 영향이 매우 크다. 설비 이용률 향상방안으로 최신기술인 FACTS의 설치 및 운용에 대한 많은 연구가 국내외적으로 활발히 수행되고 있다. 본 논문에서는 비선형으로 표현되는 무효전력-전압조류 방정식에서의 규정된 모션전압 범위를 만족하면서 얼마만큼의 무효전력을 증가 혹은 감소(무효전력 여유도)시킬 수가 있는 가를 평가하는 기법을 제안한다. 무효전력부하 평가는 반복적인 조류계산 혹은 최적조류계산 과정을 통하여 가능하나 이를 위해서는 많은 계산 과정이 수반될 뿐만 아니라 경우에 따라서는 수렴된 해를 얻지 못하기도 한다. 이와 같은 무효전력 여유도 평가는 각 모션에서의 전압개선을 위한 적정 무효전력 설치방안을 얻을 수 있다. 최근 전력시장의 개방추세에 맞추어 전력계통의 운전능력 평가라는 측면에서 정확한 무효전력 여유도 평가는 매우 중요한 요소로 부각되고 있다. 본 논문은 규정된 전압범위 내에서의 무효전력 부하(여유도) 평가에 관한 것으로서 선형 최적화 문제로 정식화하여 회로구성요소간의 함수특성을 판정하지 않고도 대형 실제통에의 적용이 가능한 기법에 그 특징이 있다. 이러한 기법을 미래의 한전 실제통에 적용하여 그 효용성을 입증하였다.

2. 무효전력 부하 평가 문제의 정식화

2.1 문제의 정의

본 문제는 부하모션 전압에 대한 제약조건을 만족하면서 부하모션에서의 최대 혹은 최소로 증가시킬 수 있는 무효전력량의 한계를 결정하는 문제로 정의하였다. 이의 정식화를 위하여 우선 부하모션수가  $nl$ 개이고 발전기 모션수가  $ng$ 개인 전력계통을 대상으로 임의의 부하모션  $i$ 에서의 전력조류방정식을 나타내면 식(1)과 같다.

$$Q_i = -Q_G + Q_L = -V_i \sum_{k \in K_i} V_k C_{ik} \quad i=1, \dots, (nl+ng) \quad (1)$$

여기서,  $K_i$ 는  $i$ 모션에 직결된 모션들의 집합을 나타내며  $C_{ik}$ 는 식 (2)로 주어진다.

$$C_{ik} = B_{ik} \cos \theta_{ik}, \quad \text{단 } i \neq k \quad (2)$$

이때 유도성 송전선로는  $B_{ik} = \frac{1}{x_{ik}} \leq 0$ 와 같이되며 모션  $i$ 와 대지사이의 충전용량은  $B_{ik} \geq 0$ 와 같이된다. 그리고  $i=k$ 인 경우의  $C_{ii}$ 는 식(3)과 같이 주어진다.

$$C_{ii} = -B_{is} - \sum_{k \in K, i \neq k} B_{ik} \cos \theta_{ik} \quad (3)$$

식 (1)로 주어지는 전력계통의 무효전력-전압에 관한 비선형방정식의 특성을 회로이론에 의하여 해석하고자 하는 많은 시도가 지금까지 이루어져 왔는 바 본 연구는 이들을 토대로 하였다. 기존의 연구에서는 무효전력-전압에 관한 비선형 방정식을 비선형 저항을 가지는 회로로 등가화하고 각 회로구성요소(전류원, 전압원, 선로저항)들 사이의 함수관계를 조사하고 이를 이용함으로써 특정모션에서의 변화 가능한 한계부하를 구하고 있다. 그러나 이와 같은 방법은 계통구성요소가 많은 경우 이들 사이의 함수관계를 모두 조사해야 한다는 조합적인 문제점이 있어 실제통 적용이 거의 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 계통요소들 사이의 함수관계를 조사하는 대신에 등가화한 회로에서의 한계부하를 선형최적화 문제로 정식화함으로써 이런 문제를 극복하고 실제통에서의 적용이 가능하도록 하였다. 일반적으로 상호관계가 약하다는 위상각과 전압크기 사이의 함수관계를 무시하면 무효전력-전압에 관한 식(1)에서 위상각  $\theta_{ik}$ 는 파라미터가 된다. 이와 같은 경우의  $Q-V$ 문제는 결국 식 (4)의 부하모션 전압제약을 만족하면서 부하모션에서의 최대 혹은 최소로 증가시킬 수 있는 무효전력량의 한계를 결정하는 문제가 된다.

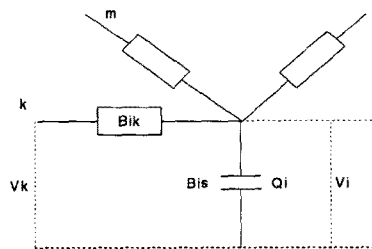


그림 1 무효전력-전압방정식에서의 표기개념

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}, \quad i=1, \dots, nl \quad (4)$$

따라서 식(1)은 모든 전압 제어모션 즉,  $i=nl+1, \dots, ng+nl$ 에 대하여 주어지는 전압크기와 부

하모선인  $i=1, \dots, n$ 에서 주어지는 무효전력  $Q_i$ 에 대해 미지수가  $V_i$ ,  $i=1, \dots, n$ 인 연립방정식이 되며  $Q-V$ 문제는 식(4)의 제약조건에서 전압해가 유일하게 존재하도록 하는  $Q_i$ 의 변화 한계값을 구하는 문제가 된다. 본 연구에서는  $Q-V$ 문제를 비선형 전원 및 선형 저항회로로 구성되는 회로로 등가화하고 이에 대한 해는 최적화 문제로 정식화함으로써 무효전력부하의 한계값을 직접적으로 계산할 수 있도록 하였다.

## 2.2 등가회로의 구성

본 문제는 부하모선전압에 대한 제약조건을 만족하면서 무효전력부하와 전압을 정상상태에서의 운전점이라고 가정하면 임의의 모선  $i$ 에서의 무효전력의 증분은  $\Delta Q_i = Q_i - Q_i^0$ 로, 전압증분은  $\Delta V_i = V_i - V_i^0$ 로 표시된다. 만약, 임의의 부하모선  $k$ 로 유입되는 무효전력이 변했다고 하면 증분식은 식(5), (6)과 같이 된다.

$Q_i^0, (i=1, \dots, n)$  : 무효전력부하

$V_i^0, (i=1, \dots, n)$  : 모선전압

$$\frac{Q_i^0}{V_i^0 + \Delta V_i} - \frac{Q_i^0}{V_i^0} = - \sum_{j=1}^n C_{ij} \Delta V_j, \quad i \neq k \quad (5)$$

$$\frac{Q_k^0 + \Delta Q_k}{V_k^0 + \Delta V_k} - \frac{Q_k^0}{V_k^0} = - \sum_{j=1}^n C_{kj} \Delta V_j, \quad i = k \quad (6)$$

따라서 정상상태 운전점에서 모든 모선전압은 주어진 범위내에 존재한다고 하면  $Q-V$ 문제는  $i \neq k$ 인 모선에서는  $Q_i = Q_i^0$ 로 주어지고  $k$ 모선에서는 변화후의  $Q_k$ 가 식(4)에서의 전압제약조건을 만족하는 동시에  $Q_k^0 + \Delta Q_k^{\min} \leq Q_k \leq Q_k^0 + \Delta Q_k^{\max}$ 의 부등식 관계를 갖는  $\Delta Q_k^{\max}, \Delta Q_k^{\min}$ 를 결정하는 문제로 변환이 된다.

식(5)와 (6)을 다시 전개하여 쓰면 식(7)과 (8)과 같이 되며 이는 선형저항회로에서의 전류에 관한 키르히호프 방정식의 형태가 됨을 알 수 있다.

여기서,

$$\frac{Q_i^0}{V_i^0 + \Delta V_i} - \frac{Q_i^0}{V_i^0} = - \sum_{j=1}^n C_{ij}(\Delta V_j - \Delta V_i) + \left( \sum_{j=1, j \neq i}^n C_{ij} \right) (0 - \Delta V_i), \quad i \neq k \text{에 대해서} \quad (7)$$

$$\frac{Q_k^0 + \Delta Q_k}{V_k^0 + \Delta V_k} - \frac{Q_k^0}{V_k^0} = - \sum_{j=1}^n C_{kj}(\Delta V_j - \Delta V_k) + \left( \sum_{j=1}^n C_{kj} \right) (0 - \Delta V_k), \quad i = k \text{에 대해서} \quad (8)$$

선로의 컨덕턴스는 식(9), (10)으로 주어지고

$$g_{ij} = -C_{ij} = -B_{ij} \cos \theta_{ij}, \quad i \neq j \quad (9)$$

$$g_{ii} = \sum_{j=1}^n C_{ij} = \sum_{j=1}^n C_{ij} + C_{ii} = -B_{ii} - \sum_{j=1}^n B_{ij}(1 - \cos \theta_{ij}) \quad (10)$$

전원에 해당하는 전압제어 전류원(voltage controlled current source)은 식(11), (12)과 같이 주어진다.

$$I_k(\Delta V_i) = \frac{Q_i^0}{V_i^0 + \Delta V_i} - \frac{Q_i^0}{V_i^0}, \quad i \neq k \quad (11)$$

$$I_k(\Delta V_k) = \frac{Q_k^0 + \Delta Q_k}{V_k^0 + \Delta V_k} - \frac{Q_k^0}{V_k^0}, \quad i = k \quad (12)$$

## 2.3 최적화 문제로의 정식화

$k$ 노드에서의 한계 무효전력부하를 평가하는 문제는  $k$ 노드를 제외한 모든 노드에 전압제어 전류원이 존재하고 선로의 컨덕턴스가 주어지는 회로에서  $I_k(\Delta V_k)$ 의 한계값을 결정하는 문제가 된다. 물론 이때 각 전압제어 전류원은 전압한계값에 의하여 정해지는 최대 및 최소값이 존재하게 된다. 이와 같은 회로조건하에서  $I_k(\Delta V_k)$ 의 한계값을 구하기만 한다면  $k$  모선에서의 최대 혹은 최소로 증가시킬 수 있는 무효전력 한계값 ( $\Delta Q_k^{\max}, \Delta Q_k^{\min}$ )을 계산할 수 있다. 이는 각 회로구성 요소들 사이의 단조(Monotonic)함수 특성을 조사함으로써 가능하다. 본 연구에서는 실제용 적용시의 문제점을 고려하여 전압에 대한 부등식 제약조건을 증분형태로 주어지는 등식제약조건으로  $I_k(\Delta V_k)$ 에 관한 함수를 목적함수로 하는 비선형 최적화문제로 정식화하였다.

$$\text{목적함수} : \sum_{j=1}^n C_{kj} \Delta V_j$$

$$\sum_{k=1}^n C_{ik} \Delta V_k + \frac{Q_i^0}{(V_i^0)^2} \Delta V_i = 0$$

$$\text{제약조건} : \text{for } i=1, \dots, k-1, k+1, \dots, n, \\ \Delta V_i^{\min} \leq \Delta V_i \leq \Delta V_i^{\max} \quad \text{for } i=1, \dots, n$$

$$\text{단, } \Delta V_i^{\min} = V_i^{\min} - V_i^0, \quad V_i^{\max} = V_i^{\max} - V_i^0$$

## 3. 사례 연구

정식화한 최적화 문제를 이용하여 한편의 2000년 계통을 대상으로 모선들에서의 변화가능한 무효전력량을 계산하고 상정사고시 전압해소방안으로서의 효과적인 무효전력 보상개소를 추정하였다. 각 모선에서의 전압 상한을 0.95pu와 1.05pu로 하였을 경우 기본계통(base case)에서의 모든 모선에 대한  $\Delta Q^{\min}$  및  $\Delta Q^{\max}$ 를 계산하였으며 표 1에 일부모선에 대한 결과를 나타내었다. 여기서 알 수 있는 바와 모선전압이 상·하한 내에 존재하는 경우 모든 모선에서 무효전력량 여유분이 존재함을 알 수 있다.

표 1 기본계통에서의 한계 무효전력 부하량

모선이름	기준전압	전압	$\Delta Q^{\min}$ (MVAR)	$\Delta Q^{\max}$ (MVAR)
신영주345	345.00	1.00318	-194.712	211.552
동해345	345.00	0.99308	-199.952	276.757
신체천345	345.00	0.98246	-95.060	141.943

본 사례연구에서는 의정부 345kV - 울진 345kV 선로 및 울진 345kV - 신영주 345kV가 개방되는 경우를 상정하여 한계 무효전력부하 증가량을 분석하였다. 표 2에 이와 같은 상정사고시의 모선전압 중 하한전압(0.95pu)이하로 떨어진 저전압 현황을 나타내었다.

이에 본 연구에서 개발한 알고리즘을 이용하여 상기의 저전압 문제를 해소하는데 필요한 효과적인 무효전력량 투입개소 및 투입량을 추정하였다. 이는 FACTS의 한 형태인 SVC와 같은 병렬 무효전력 보상장치의 설치개소 및 용량을 염두에 두고 한 것이며 단위 설치용량은

고려하지 않았다.

표 2 상정사고시의 저전압현황

모선이름	기준전압(kV)	전압(pu)	모선이름	기준전압(kV)	전압(pu)
의정부345	345	0.9428	신용인345	345	0.9232
성동345	345	0.9377	청원345	345	0.9265
미금345	345	0.9362	신영주345	345	0.9435
영서345	345	0.9454	동해345	345	0.9130
동서울345	345	0.9246	신계천345	345	0.9020
영등포345	345	0.9412	주문진154	154	0.9462
신양지345	345	0.9230	양 양154	154	0.9295
신시흥345	345	0.9462	속초154	154	0.9248
신아산345	345	0.9323	간성154	154	0.9290
신성남345	345	0.9347	신옥천345	345	0.9490
서서울345	345	0.9480	서산345	345	0.9437

### 3.1 모선에서의 무효전력 보상만에 의한 경우

본 경우에서는 모선에서의 무효전력 보상만에 의한 경우를 고려하였다. 우선 가장 전압이 낮은 신계천 345kV모선의 전압을 전압 하한치인 0.95pu로 상승시키기 위해서는 신계천 345kV모선에 810.309MVAR의 무효전력을 보상해야 한다는 것을 제안한 방법에 의하여 평가하였으며 이와 같은 과정을 반복한 결과 표 3과 같이 5개소에 무효전력을 보상함으로써 인하여 표 2에 나타난 저전압개소를 규정전압 이내로 유지할 수 있음을 알 수 있으며, 보상해야 할 총 무효전력량은 1442.937 MVAR이다.

표 3 모선에서의 무효전력 보상만에 의한 경우 보상개소 및 보상량

보상개소	보상량(MVAR)	보상개소	보상량(MVAR)
신계천345	810.309	동해 345	93.209
신양지345	288.652	신용인 345	62.490
청원345	190.277	총 보상량	1444.937

### 3.2 울진 345kV-동해 345kV선로정수 및 모선에서의 무효전력 보상에 의한 경우

울진 345kV-동해 345kV선로의 임피던스를 TCSC와 같은 FACTS에 의하여 50% 보상하는 경우의 모선에서의 무효전력 보상방안을 검토하였다. 우선 울진345kV-동해 345kV선로를 보상한 경우의 저전압 현황은 표 4와 같다.

표 4 울진 345kV-동해 345kV선로보상시의 저전압 현황

모선이름	기준전압(kV)	전압(pu)	모선이름	기준전압(kV)	전압(pu)
의정부345	345	0.9471	신성남345	345	0.9385
성동345	345	0.9426	신용인345	345	0.9273
미금345	345	0.9412	청원345	345	0.9299
영서345	345	0.9475	신계천345	345	0.9228
동서울345	345	0.9305	양 양154	154	0.9492
영등포345	345	0.9434	속초154	154	0.9439
신양지345	345	0.9270	간성154	154	0.9466
신시흥345	345	0.9482	서산345	345	0.9467
신아산345	345	0.9361			

표 4와 같이 선로 임피던스 보상에 의하여 서서울 345kV, 신영주 345kV, 동해 345kV, 주문진 154kV, 신옥천 345kV모선에서의 전압은 해소되었으나 나머지 17개소에서 저전압을 나타내고 있다. 이와 같은 경우 가장 저전압을 나타내고 있는 신계천 345kV 모선에서

의 0.95pu유지에 필요한 무효전력량은 계산결과 469.398MVAR였으며 이와 같은 과정을 반복한 후, 표 4와 같이 4개소에서의 무효전력 보상 및 선로임피던스 보상에 의하여 표 3에 나타난 저전압개소를 규정전압 이내로 유지할 수 있음을 알 수 있으며 보상해야 할 총 무효전력량은 1067.654MVAR이다.

표 5 울진 345kV-동해 345kV 선로 임피던스 및 모선에서의 무효전력 보상에 의한 경우 보상개소 및 보상량

보상개소	보상량(MVAR)	보상개소	보상량(MVAR)
신계천345	469.388	신용인345	84.907
신양지345	311.190		
청원345	202.169	총보상량	1067.654

### 3. 결 론

본 논문은 전력계통의 무효전력 부하평가 및 이의 증대를 위한 것으로서 전압-무효전력에 관한 비선형방정식으로 부터 등가의 회로방정식을 유도하였으며 이를 통하여 모선에서의 무효전력 부하 평가문제를 대형 실계통에도 적용이 가능한 선형최적화 문제로 정식화하였고 이를 통하여 반복적인 조류계산에 의하지 않고도 주어진 모선에서의 무효전력 부하를 평가할 수 있는 수학적 모델을 제시하였다. 본 모델에 의해서는 주어진 전압범위 내에서의 최대·최소 증가 가능한 무효전력량의 계산 및 주어진 전압한계의 유지에 필요한 무효전력원 설치개소 및 그 양을 계산할 수 있어 전압문제 발생시의 효과적인 무효전력원 운용방안 수립이 가능하다. 이를 2000년 한전 실계통에 적용하여 그 효과를 입증하였다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Ilic, M., "Network-theoretic conditions for existence and uniqueness of steady state solutions to electric power circuits" Proc. ISCAS'92, pp. 2821-2828, SanDiego, 1992.
- [2] Hasler, M., Wang, C., "Monotonic dependence on sources in non-linear resistive circuits", AEU, Int. Journal of Electronics and Comm., Vol. 46, pp. 242-249, July, 1992.
- [3] 한전전력연구원, "FACTS에 의한 계통제어 및 복구운영 기법 개발에 관한 연구", 최종보고서, 1998. 9.
- [4] 윤용범, 주진부, "선형계획법을 이용한 무효전력 여유도 평가 및 감도해석 기법", 대한전기학회 논문지, Vol. 47, No. 5, pp. 555- 562, 1998. 5.