

# 노드분할에 대한 모선 임피던스 행열 수정방법 연구

오 용 태<sup>o</sup>

한국기술교육대학

문 영 현

연세대학교

## A study of Modifying Bus Impedance Matrix for Node Separation

Oh,Yong-Taek  
Korea Institute of  
Technology and Education

Moon, Young-riyun  
Univ. of Yonsei

### < Abstract >

Short Circuit analysis is one of the most fundamental procedures for power system analysis problem. In order to solve the problem, it's required to develop an advanced algorithm by which modified bus admittance matrix are easily computed for a large number of alternative network configuration.

This paper proposes a new calculation method to efficiently modify the bus impedance matrix elements of large power system by method for removal of link, and presents its practicality by applying the proposed method in the power system model.

### 1. 서 론

전력계통의 계획운용·검토에 있어 단락용량 문제는 중요한 문제로서, 계통운용시에 계통 구성 변경에 따라 반복적으로 수행하여 진다. 최근에 단락용량 증가는 계통규모의 확대로 증가되고 있으며 단락용량 대책은 여러가지 형태로 검토되고 있으나 아직도 송전선의 상당부분이 환상으로 연결되어 운전되고 있으므로 단락용량의 억제책으로 기간변천소의 모선절체를 행함으로 일시적인 단락전류 억제책이 주효하게 대두되고 있다.

이와같은 계통구성의 변경대책을 구성하기 위해서는 여러경우의 대체안에 대해 단락전류의 억제효과를 효율적으로 계산하는 방법이 필요하게 되었으며, 계통구성을 일부 변경한 경우에도 임력데이터를 다시 작성하고, 재계산을 수행하여야 했으며 대규모 계통인 경우에 검토사례가 많은 경우에는 상당히 많은 노력이 필요하게 되었다. 최근에는 Takahashi<sup>1)</sup>등이 단락용량의 계산을 위해 모선임피던스를 수정하는 방법을 제시하였으나 모선의 연결구조 및 모선의 전위분포를 계산하여야 하는등 적용상에 어려운점이 있다.

본 논문에서는 기존의 기본 계통구성에서 파생되는 복수의 변경계통 즉 대체안에 대해 모선분할을 수행하기 위해 모선어드미턴스의 수정분을 변칙적 운용형태로 구성하여 링크제기 방법<sup>2)</sup>으로 모선임피던스를 수정한다. 제시한 링크 제기방법은 전력계통

모델에 적용하여 등가 임피던스를 비교함으로서 실용성을 입증하였다.

### 2. 등가 임피던스의 수정계산

본장에서는 계통변경에 따르는 임피던스 행열요소의 수정분을 간단한 방법으로 구할 수 있는 새로운 계산식을 제안한다. 일반적으로 네트워크의 변경에는 브랜치의 개방, 투입과 모선절체와 같은 노드의 분할 및 결합방법이 있다. 브랜치의 개방, 투입에 대한 계산방법<sup>2), 4)</sup>은 이미 개발되어져 있다. 그러나, 노드의 분할 및 결합방법은 최근에 전체적인 계통의 전위 및 전류의 분포를 계산하여 등가 임피던스를 수정하는 방법<sup>1)</sup>을 제시한바 있으나 적용상의 많은 난점이 있다.

본 논문에서는 임의의 노드를 분할하는 경우 모선 어드미턴스 행열 수정분을 쉽게 계산하고 기존 계통의 삼각인수 모선 임피던스를 수정하여 효율적으로 등가 임피던스를 구하는 새로운 방법을 제안한다.

특정 노드 p를 q로 분리하는 경우를 생각하면 우선 거의 선로 임피던스가 영인 가상의 선로를 분리할 모선에 연결하고, 링크 제거 알고리즘으로 링크를 제거함으로서 새로운 모선으로 쉽게 분리할 수 있다. 임의의 분리할 모선에 선로 임피던스가 거의 영인 요소를 추가하였으므로 원래 계통의 모선 임피던스는 크게 변화하지 않을을 알 수 있고, 그의 요소를 링크 제거법으로 제거 함으로서 모선 분할에 따른 임피던스 수정을 간단히 행할 수 있다.

링크제거 방법은 모선어드미턴스의 변화분을 수정함에 의해 효과적으로 수행할 수 있도록, 모선 임피던스와 모선어드미턴스의 행열성질을 이용하여 알고리즘을 유도하였다.

그림 1과 같이 임의의 특정모선 p를 분할하기 위해 q보선을 생성하고 가상의 임피던스가 영인 선로를 연결한다.

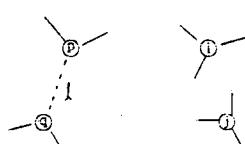


그림 1. 노드 p의 분할

Fig. 1. Separation of Node p

모선 p와 q를 선로로 연결한 후 계통에 대한 모선 임피던스 행렬 및 모선 어드미턴스 행렬, 원시 임피던스, 원시어드미턴스 행렬을 표.1과 같이 정의한다. 여기에서 변형계통은 선로 1이 제거된 계통을 의미한다. 또한 선로 1의 자체 임피던스를  $Z_{aa}$ 로 표시하고 선로 1과 상호 결합된 임피던스항을  $Z_{ab}$ 로 표시한다.

표.1. 계통 행렬 정의

Table.1. Matrix Notation for Network

	기준계통	변형계통
모선어드미턴스	$Y_{bus}^o$	$Y_{bus}^n$
모선임피던스	$Z_{bus}^o$	$Z_{bus}^n$
원시어드미턴스	$Y_o$	$Y_o^n$
원시임피던스	$Z_o$	$Z_o^n$
결합행렬	$A_o$	$A_n$

기준계통의 원시 임피던스 행렬을 링크 제거후의 계통으로 나타내면 아래식과 같이 구성할 수 있다.

$$Z_o = \begin{bmatrix} Z_o^n & Z_{oa} \\ Z_{ao} & Z_{aa} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{단 } Z_{ao} = Z_{oa}^T$$

여기서 원시 어드미턴스 행렬은 원시 임피던스와 상호 단위 행렬성질을 이용하여 아래식과 같이 구성할 수 있다.

$$Y_o^n = [Z_o^n - Z_{oa} Z_{aa}^{-1} Z_{oa}^T]^{-1} \quad (2)$$

$$yao = -Z_{aa} Z_{oa}^T [Z_o^n - Z_{oa} Z_{aa}^{-1} Z_{oa}^T]^{-1} \quad (3)$$

$$yaa = Z_{aa}^{-1} \{ I + Z_{aa}^T [Z_o^n - Z_{oa} Z_{aa}^{-1} Z_{oa}^T]^{-1} Z_{oa} Z_{aa}^{-1} \} \quad (4)$$

단  $yaa$  : 가상 선로의 자체 어드미턴스

$yao$  : 기준 선로와 상호 어드미턴스

I : 단위 행렬

기준 계통, 즉 선로가 추가된 모선 등가 어드미턴스는 식 (2), (3)을 이용하여 계산하면 아래식과 같이 유도할 수 있다.

$$Y_{bus}^o = A_o Y_o^n A_o^T + K_{lyaa} A_a^T + A_yaa K_a^T + K_l yaa K_l^T \quad (5)$$

단  $K_l$  : p번째 요소에서 q번째 요소로 연결됨을 나타내는 결합 열벡터

여기에서 선로 1이 제거된 계통을 기준으로 나타내면 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$Y_{bus}^n = [Z_{bus}^o]^{-1} - D yaa D^T \quad (6)$$

$$\text{단 } D = A_n yaa yaa^{-1} + K_l$$

위식을 역행렬 보조정리로서 전개하면 아래와 같은 수정 과식을 유도할 수 있다.

$$Z_{bus}^n = Z_{bus}^o - Z_{bus}^o D [D^T Z_{bus}^o D - Z_{aa}] D^T Z_{bus}^o \quad (7)$$

$P_{ai}$ 는 모선 임피던스 구축알고리즘으로 링크 제거에 대한 알고리즘을 유도하였으나 본 연구에서는 행렬의 단위 성질을

이용하여 간단하게 해석할 수 있었다.

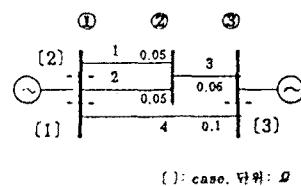
본 연구에서 링크 제거를 위한 방법을 위해  $Z_{aa}$ 는 거의 0으로 하였고, 제거될 링크의 상호 결합은 없으므로 D에서  $K_l$  성분만 남으므로 변화분은 간단히 수정할 수 있고, 이 변화분을 계산하기 위해 본 연구에서는 삼각 최적화 기법<sup>[3],[5]</sup>으로 원도신에 대한 모선 임피던스를 계산하고 수정분에 대해서는 원래의 모선에 대한 값을 이용하여 효율적으로 계산할 수 있었다.

### 3. 사례연구

본 장에서는, 제안한 링크 제거방법에 의한 모선 임피던스 수정법으로 등가 임피던스를 수정하고 각 모선의 분리한 등가 임피던스와 비교하여 정확성을 검증하고 실용성을 검토한다.

#### 3.1 예제 계통의 적용

예제 계통<sup>[2]</sup>으로는 그림.2와 같고 기본 계통 및 링크 제거 시에 결과 값은 표.2와 같이 제시한 방법과 종래의 방법에 의한 방법과를 계산비교할 수 있었다. 단 각 분리할 모선의 가상 선로 임피던스는  $10^{-5}$ 정도로 가정하였다.



( ): case, 단위: M

그림.2. 3-모선 예제 계통

Fig.2. 3-Bus Example System

#### 표.2. 등가 임피던스 비교

Table.2. Comparison of Equivalent Impedance

	모선	종래의 방법	제시한 방법
기본계통	1	0.124	0.124
	2	0.1316	0.1316
	3	0.1193	0.1193
case 1	1	0.1332	0.13318
	2	0.1336	0.13365
모선1 분할	3	0.1252	0.12523
	1'	0.2252	0.2253
case 2	1	0.1256	0.1256
	2	0.1389	0.13886
모선1 분할	3	0.1204	0.12038
	1''	0.1889	0.18886
case 3	1	0.1332	0.13319
	2	0.1336	0.13365
모선3 분할	3	0.1252	0.12523
	3'	0.2332	0.2333

### 3.2 실 규모 모델 계통의 적용

실규모 형태의 모델로는 IEEE 30 모선 계통<sup>2)</sup>을 제안한 방법으로 등가임피던스를 계산하고 종래의 방법과 제인한 광범위 계산 결과를 비교하였다.

30모선 모델계통 적용에 있어서 선로 임피던스, 선로 케페시턴스 및 부하 데이터, 변압기 연결 데이터는 IEEE 데이터를 이용하였고, 발전기의 정상, 악성, 비상 임피던스는 모선 발전기 용량으로 설정하였으며 계통도는 그림.3과 같다. 여기에서 모선 10을 분할하는 경우로서 case1: 모선 9, case2: 모선 17, case3: 모선 20, case4: 모선 21, case5: 모선 22, case6: 모선 6의 선로를 절제하는 것으로 하였으리. 임의 신도의 임피던스는  $10^5$  정도로 가정하였다.

각각의 경우에 대한 제시한 방법과 종래의 방법에 대한 등가임피던스는 표.3으로 보여준다.

### 4. 결 론

예제계통 및 실 규모 계통에서의 모선 절체사에 제시한 등가임피던스는 종래의 분할후 모선의 연결상태를 다시 고려하여 계산한 방법과 비교하여 거의 정확도를 유지할 수 있었으며 제안한 방법의 계산 시간은 30모선의 경우 10초 정도로 IBM 386급으로도 충분히 수행할 수 있었다.

본 논문의 제시한 링크 제거에 의한 노드 분할방법은 모선 절체에 따른 단락 용량 재계산에 있어 효율적으로 적용 할 수 있으며 여러가지 대체안에 대해 연속적으로 시뮬레이션 할 수 있으므로 제시한 방법 및 전산 프로그램은 실제적으로 실용도가 높을것으로 기대한다.

### 참고문헌

- [1] K. Tanaka, K. Takahashi : " Efficient Method for Modifying Z-Matrix Elements in Short Circuit Study", JIEE, VOL. 113, NO. 2, Pp. 131-137, FEB, 1993
- [2] M. A. Pai: " Computer Techniques in Power System Analysis ", Pp 58-75, McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1979;
- [3] W. F. Tinney, J. W. Walker: " Direct Solutions of Sparse Network Equations by Optimally Ordered Triangular Factorization", IEEE, VOL. PAS-55, NO. 11, Pp1801-1805, NOV, 1967
- [4] 문영현, 오용택, 박재용: "스 Ybus 분해법에 의한 다중사고 고장전류 해석 ", 대한 전기학회 논문지 37권 2호 Pp 73-79, 1988, 2
- [5] 문영현 외: "800 KV급 초고압 전력계통 연구. 과학술처 발행, 한국전기통신공사연구소보고서 Pp. 119-172, 475-530, 1984, 4

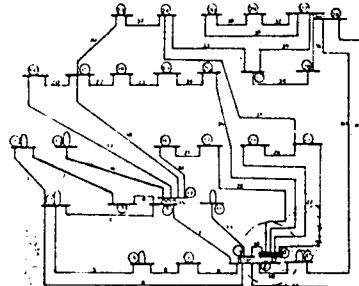


그림.3. IEEE-30 모선 계통도

Fig.3. IEEE-30 Bus System

표.3. 정상분 모선등가임피던스 비교 (IEEE-30모선)

Table.3 Comparison of Positive sequence

Equivalent Impedance (IEEE-30Bus)

	모선	종래의 방법	제시한 방법
기본 계통	9	$0.0025 + j 0.0098$	$0.0025 + j 0.0098$
	10	$0.0033 + j 0.104$	$0.0034 + j 0.0103$
	17	$0.0043 + j 0.019$	$0.0043 + j 0.019$
	20	$0.0069 + j 0.0277$	$0.0070 + j 0.0277$
	21	$0.0058 + j 0.0198$	$0.0059 + j 0.0197$
CASE 1	22	$0.0049 + j 0.0187$	$0.005 + j 0.0187$
	9	$0.0027 + j 0.0132$	$0.0026 + j 0.0132$
모선 9.	10	$0.0046 + j 0.0146$	$0.0047 + j 0.0145$
	17	$0.0056 + j 0.0230$	$0.0057 + j 0.229$
분할 (선로 14)	20	$0.0081 + j 0.0317$	$0.0082 + j 0.0315$
	21	$0.007 + j 0.0236$	$0.0071 + j 0.0235$
CASE 2	22	$0.006 + j 0.0221$	$0.0061 + j 0.022$
	9	$0.0025 + j 0.0098$	$0.0025 + j 0.0098$
모선 17	10	$0.0033 + j 0.0107$	$0.0033 + j 0.0106$
	17	$0.0745 + j 0.2686$	$0.0535 + j 0.2832$
분할 (선로 26)	20	$0.0069 + j 0.028$	$0.0069 + j 0.0279$
	21	$0.0059 + j 0.02$	$0.0059 + j 0.02$
CASE 3	22	$0.005 + j 0.0189$	$0.0049 + j 0.0189$
	9	$0.0025 + j 0.0098$	$0.0024 + j 0.0098$
모선 20	10	$0.0033 + j 0.0105$	$0.0031 + j 0.0105$
	17	$0.0043 + j 0.0191$	$0.0042 + j 0.0191$
분할 (선로 25)	20	$0.1103 + j 0.4098$	$0.0902 + j 0.4190$
	21	$0.0059 + j 0.0199$	$0.0058 + j 0.0198$
CASE 4	22	$0.0049 + j 0.0188$	$0.0049 + j 0.0187$
	9	$0.0025 + j 0.0098$	$0.0025 + j 0.0098$
모선 21	10	$0.0033 + j 0.0104$	$0.0034 + j 0.0104$
	17	$0.0043 + j 0.0191$	$0.0044 + j 0.0191$
분할 (선로 27)	20	$0.0069 + j 0.0277$	$0.007 + j 0.0277$
	21	$0.0092 + j 0.0383$	$0.0088 + j 0.0385$
CASE 5	22	$0.0053 + j 0.0229$	$0.0053 + j 0.0229$
	9	$0.0025 + j 0.0098$	$0.0025 + j 0.0098$
모선 22	10	$0.0033 + j 0.0105$	$0.0034 + j 0.0105$
	17	$0.0043 + j 0.0191$	$0.0044 + j 0.0191$
분할 (선로 28)	20	$0.0069 + j 0.0278$	$0.007 + j 0.0277$
	21	$0.0066 + j 0.0220$	$0.0066 + j 0.0219$
	22	$0.008 + j 0.0293$	$0.0077 + j 0.295$