

방사상 전력계통의 전압안정도 향상에 관한 연구

김병섭, 정운원, 신종린, 박종배  
 건국대학교 전기공학과

채명석  
 군장대학 전기과

A Study on the Voltage Stability Enhancement in Radial Power System

Byung-Scoop Kim, Yun-Won Jeong, Jong-Bae Park, Joong-Rin Shin,  
 Dept. of Electrical Eng. Konkuk Univ..

Myung-Suk Chae  
 Dept. of Electrical Eng. KunJang College

Abstract - This paper presents a new approach using an Improved branch exchange (IBE) technique to maximize the voltage stability as well as loss minimization in radial power systems. A suitable voltage stability index (VSI) for optimal routing algorithm is developed using novel methods both a critical transmission path based on a voltage phasor approach and an equivalent impedance method. Furthermore, the proposed algorithm can automatically detect the critical transmission path to be reached to a critical load faced with voltage collapse due to additional real or reactive loading. To develop an effective optimization technique, we also have applied a branch exchange algorithm based on a newly derived index of loss change. The proposed IBE algorithm for VSI maximization can effectively search the optimal topological structures of distribution feeders by changing the open/closed states of the sectionalizing and tie switches. The proposed algorithm has been tested with the various radial power systems to show its favorable performance.

1. 서 론

배전자동화(distribution system automation) 시스템의 실현과 더불어 배전계통을 포함한 방사상 전력계통의 최적 운영에 대한 관심이 증대되고 있다. 일반적으로 배전계통은 방사상으로 운영되기 때문에 배전계통에 선비되어 있는 구간개폐기(sectionalizing switch)와 연계개폐기(tie switch)의 적절한 개폐상태(on/off state)를 조작하여 급전선의 계통구성(topology)을 변화할 수 있다. 그러므로 급전선의 부하 이동을 결정하는 연계개폐기의 최적 선정은 전체 대상계통의 운전효율 향상에 현저하게 기여할 수 있다.

최근에는 이러한 목적으로 방사상 전력계통의 전압 안정도에 관한 연구가 활발하게 논의되고 있다[1,2]. 전압 불안정 현상은 특정 모선의 전압 붕괴(voltage collapse)를 유발할 수 있으며, 지속적인 손실 증가와 전압 붕괴의 파급으로 계통 전체를 광역정전(black out)에 이르게 할 수 있기 때문에, 전력계통의 운영과 계획 분야에서 중요한 문제로 인식되고 있다. 일반적으로 전력계통의 전압 불안정 현상은 전송선로의 전송능력을 초과하는 과중한 부하 조건에서 발생하며, 지역적으로 불충분한 무효전력의 공급[5,6] 등의 원인으로 발생한다.

본 논문에서는 전송선로의 라우팅 알고리즘을 이용하여 방사상 계통의 전압안정도를 향상시킬 수 있는 새로운 알고리즘을 제시하였다. 제안된 알고리즘은 새롭게 유도된 전압안정도 지수(Voltage Stability Index : VSI)를 최대화시키는 최적화 문제의 형태로 정식화하였다. 계통의 빈번한 구성 상태의 변경에 따른 전압안정도를 신뢰성있는 기법으로 평가하기 위하여 임계전송경로[3]와 임피던스 축약기법[5]에 바탕을 두는 전압안정도 지수군 유도하였다. 또한 전압안정도의 최대 향상을 도모할 수 있는 급전선 최서 라우팅 알고리즘은 대표적인 휴리스틱 탐색전략으로 인정되고 있는 선로교환 기법을 이용하여 지역탐색 알고리즘으로 사용하였으며, 탐색시간의 효율과 실시간 적용에 가능성을 모색하고자 하였다. 특히 수정된 선로교환법에서는 선로변화에 따르는 손실변화량을 효과적으로 평가하기 위하여 새로운 손실지표[7]를 제안하였으며, 선로교환 기법의 적용에 있어서 전력조류 계산으로 인한 과도한 계산시간의 비효율성을 극복할 수 있도록 하였다. 제안된 알고리즘의 신뢰성 검토를 위하여 IEEE 32, 69 모선에 적용하였으며, 실제계의 적용가능성을 모색하기 위하여 KEPCO 148모선 계통[6,8]에 적용하여 알고리즘의 효용성을 검증하였다.

2. 문제의 정식화

본 논문에서 고려되는 전압안정도 향상을 위한 문제는 계통의 유효전력 손실을 최소화하여 현재 계통의 전압 안정도를 극대화하는 조합최적화 형태로 정식화 할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 목적에 부합하기 위하여 최적 경로선정 문제의 목적함수와 제약조건을 다음과 같이 제안하였다.

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } \text{VSI}(X) \\ & X \in \Omega \\ \text{s.t. } & G_E(X) = 0, \quad G_R(X) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\bar{S}_{i,i+1} - \bar{S}_{i,i+1}^{\max} \leq 0, \quad i=1, \dots, N$$

여기서,

$$\Omega = \{X^* \mid P_L(X^*) \leq P_L(X), X \in \Gamma\}$$

$$G_R = \{h_1(x) + h_2(x) + h_3(x) \mid x \in \Gamma\}$$

$$X = \{\bar{S}_i, \bar{V}_i \mid i=1, \dots, N\}$$

$P_L(\cdot)$ : 계통의 유효전력 손실 방정식

$G_E(\cdot)$ : 전력평형 방정식에 대한 등호제약 조건

$G_R(\cdot)$ : 방사상 계통 구성에 대한 등호제약 조건

$VSI(\cdot)$ : 계통의 전압안정도 평가 방정식

$\bar{S}_i = P_i + jQ_i$ : 모선 (i)에서 유출되는 전력 조류 페이저

$\bar{V}_i$ : 모선 (i)의 전압 페이저

$\bar{S}_{i,i+1}$ : 연계모선 (i, i+1)에서 사이의 선로 조류 페이저

$\bar{S}_{i,i+1}^{\max}$ : 연계모선 (i, i+1)에서 허용 가능한 선로 조류 페이저

그리고,  $N$ 은 공급모선을 제외한 부하모선 집합이고,  $\Gamma$ 는 선로교환 최적화 과정에서 구성 가능한 계통의 전체집합을 의미한다. 또한  $h_1(x), h_2(x), h_3(x)$ 은 방사상 계통구성을 위한 상호 독립적인 제약조건을 의미한다. 이들의 상세한 수식형태는 참고 문헌[9]에 제시하였다.

3. 전압안정도 평가지표의 정식화

3.1 임계전송경로의 개념

임의의  $n$  모선으로 구성되는 방사상 전력계통은 전송경로로 구성하는 부하들의 영향으로 선로의 손실이 발생하며, 결과적으로 각 모선에서 순차적인 전압강하를 나타낸다. 기존 연구[7]에서는  $n$  번째 모선의 전압강하 페이저를 발원모선의 전압 페이저에 투영하여 임계전송경로의 개념을 도입하였다. 이러한 개념은 다음의 페이저도와 그에 따르는 전압강하 조각으로 설명할 수 있다. 전압강하 페이저도의 예시는 참고문헌[3]에 표현되어 있다. 전압 페이저도에서 개별적인 전압강하 페이저를 공급모선의 전압 페이저상에 투영하는 성분으로 표현할 수 있으며, 이를 확장하여 개별 전압강하 성분의 전체 선형 합으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta \bar{V}_d' = \sum_{i=1}^n \Delta \bar{V}_{di} = \sum_{i=1}^n (V_i - V_{i+1} \cos \delta_{i,i+1}) \cos \delta_{i,i} \quad (2)$$

전압강하 페이저의 직축 성분의 최종식을 이용하면  $n$  모선

방사상 전력계통의 임계 전송경로를 정의할 수 있다. 임계 전송 경로는 전압페이저가 지속적으로 감소하는 전송경로를 따라서 형성될 수 있으며, 전송경로의 공급능력을 상회하는 부하증가에 따라 임계전송 경로의 말단 부하모선에서 전압붕괴가 일어나게 된다. 그러므로 본 논문에서는 임계전송 경로의 이론을 주 급전선(main feeder)과 지선(lateral)을 포함하는 일반적인 n 모선 방사상 계통의 전압안정도 평가에 적용하였다.

### 3.2 전압안정도 평가지표의 유도

방사상 계통의 전압 안정도 지표의 수학적인 정식화 과정은 단일선로 계통의 특성을 이용하여 유도할 수 있다. 제한된 지표의 개념은 자코비안 행렬의 특이성 조건을 이용하는 것이다. 전압안정도 지수의 유도를 위하여 2모선 전력계통도를 도시하였다.



그림 1 2모선 전력계통도  
Fig 1 Diagram of two bus power system

공급모선을 기준모선(reference bus)으로 간주하여 2모선 계통의 전력수정 방정식을 정의할 수 있으며, 그에 따른 자코비안 행렬의 행렬식을 정의할 수 있다.

$$\det J = \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} - \frac{\partial P_2}{\partial V_2} \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} \quad (3)$$

수정방정식의 자코비안 행렬은 계통의 상태정보를 담고 있기 때문에 자코비안의 특이행렬(singula matrix)은 대상 계통의 임계 운전점을 의미하며, 전압붕괴 운전점으로 표현할 수 있다. 전압 불안정 조건식을 유도하기 위하여 일반화된 i 모선의 전력방정식(power equation)을 이용하여 자코비안 행렬의 편미분 항을 정의할 수 있다. 최종적으로 정리된 자코비안의 행렬식으로부터 특이행렬의 조건식은 다음과 같이 모선전압과 위상각의 함수 형태로 유도된다.

$$2V_2 \cos \delta = V_1 \quad (4)$$

앞서 유도된 2모선 계통의 전압불안정 조건식은 전압강하 페이저도의 직축 투영성분을 이용하여 다음과 같이 재정의 할 수 있다.

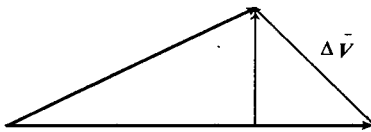


그림 2 2모선 전력계통의 페이저도  
Fig 2 Phasor diagram of 2 bus power system

$$0.5 V_1 = \Delta V_d \quad (5)$$

전압 페이저도에서 정의된 전압불안정 조건식은 기준모선의 전압페이저의 크기가 일정하게 유지되어야 하므로 전압강하 페이저의 직축투영성분의 합수로 정의할 수 있다. 전압강하 페이저의 직축 성분은 OFR 알고리즘에 적용하기 위하여 동일한 물리량의 임피던스와 전력의 관계식으로 변형되어야 한다. 전압 페이저도에서 전압 강하 페이저를 직각 좌표 형태의 복소수로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \bar{V} = \Delta V_d + j\Delta V_q \quad (6)$$

한편, 전압 강하 페이저와 각 모선의 전압 페이저 사이의 관계식은 2 모선 계통의 전류와 임피던스 관계로부터 정의할 수 있다. 전압 강하 페이저 수식에 전류와 임피던스 페이저의 수식을 대입하여 정리하면 전압강하 페이저의 직축과 횡축 성분은 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta V_d &= (Pr + Qx) / V_1 \\ \Delta V_q &= (Px - Qr) / V_1 \end{aligned} \quad (7)$$

상기 수식의 직축 성분을 이용하면 2 모선 계통의 전압안정도를 효과적으로 평가할 수 있다. 상기 유도된 직축 성분은 임의의 다모선 방사상 계통에 적용할 수 있는 형태로 확장하기 위하여 임피던스 축약기법을 적용하면 다음과 같은 형태의 전압안정도 지표를 정의할 수 있다.

$$VSI = 0.5 V_1 - \Delta V_d^{CTP} \quad (8)$$

$$\begin{cases} P_{eq} = \sum P_{Li}^{CTP} + \sum P_{Di}^{CTP} & , \quad Q_{eq} = \sum Q_{Li}^{CTP} + \sum Q_{Di}^{CTP} \\ r_{eq} = \sum P_{Li}^{CTP} / (P_{eq}^2 + Q_{eq}^2) & , \quad x_{eq} = \sum Q_{Li}^{CTP} / (P_{eq}^2 + Q_{eq}^2) \end{cases}$$

여기서,

$$\Delta V_d^{CTP} = (P_{eq} r_{eq} + Q_{eq} x_{eq}) / V_1$$

$P_{Li}^{CTP}$ : 임계전송경로의 선로 i의 유효전력 손실

$Q_{Li}^{CTP}$ : 임계전송경로의 선로 i의 무효전력 손실

$P_{Di}^{CTP}$ : 임계전송경로의 모선 i의 유효전력 부하

$Q_{Di}^{CTP}$ : 임계전송경로의 모선 i의 무효전력 부하

## 4. 개선된 선로교환 기법

### 4.1 개선된 선로교환기법

임의의 방사상 계통은 연계개폐기를 기준으로 루프계통(loop network)을 형성하게 되며 이러한 다수의 루프계통은 방사상 배전계통 전체를 구성하게 된다. 선로교환 기법에서는 개폐 동작에 참여하는 급전선의 방사상 구조를 유지하기 위하여 한 개의 구분개폐기와 그에 대응하는 연계개폐기의 개방과 투입을 동시에 수행해야 한다. 이렇게 한 쌍(pair)의 형태로 개폐동작을 수행하는 것을 선로 교환이라고 하며, 이러한 선로 교환 동작을 경험적으로 수행하여 최적해를 도출하는 기법을 선로교환 알고리즘(branch exchange algorithm)이라고 한다. 본 논문에서 제안된, MBE 기법은 선행연구[7]에서 수행되었던 최대손실감소 루프계통의 개념과 선로교환에 따르는 손실지표(AIOL)의 평가기법을 적용하였다. 임의의 탐색단계에서 결정된 최대 손실감소 루프계통을 k라고 한다면 다음과 같은 결정수식으로 최적의 선로교환 후보를 결정할 수 있다.

$$\Delta IOL^k = \Delta P_{loss}(S) + \Delta Q_{loss}(T) \quad (9)$$

여기서,

$(\cdot)^k$ : k 번째 루프계통의 전력조류에 관한 물리량

$\Delta P_{loss}$ : 유효분 손실의 변화량 방정식

$\Delta Q_{loss}$ : 무효분 손실의 변화량 방정식

S, T: 선로교환으로 이동되는 전력량에 관한 변수벡터

### 4.4 제안된 알고리즘의 진행절차

본 논문에서 제안된 최종 알고리즘의 수행절차는 다음과 같다. 반복수행 과정에서 상태변수를 갱신하기 위하여 사용된 조류 계산기법은 Distflow[6]기법을 이용하였으며, VSI의 평가를 안정적으로 수행하도록 하였다.

- Step 1) 최대손실감소 루프계통을 선택
- Step 2) 최대손실 루프계통에서 연계선로와 인접선로의 선로교환을 연속적으로 수행하고, 손실지표를 통하여 손실 변화량을 계산하고 저장한다.
- Step 3) 손실변화량의 크기를 정렬하고, 제약조건을 만족하는 최적의 선로교환을 현재단계의 선로교환으로 결정한다.
- Step 4) 결정된 선로교환으로 신설되는 계통을 조류계산으로 평가하고 전압안정도 지표(VSI)를 평가한다.
- Step 5) VSI의 값과 손실변화량의 수렴여부를 검사한다.

## 5. 사례연구

제안한 알고리즘은 IEEE 32, 69모선[6]의 배전계통 예제모델과 KEPCO 148모선[8]에 적용하여 그 효율성을 확인하였다. 제안한 알고리즘의 수행은 Pentium 400MHz PC에 의해 수행되었다.

예제모델의 초기구성에 대한 요약은 표 1에 나타내었다.

표 1 시험제도의 요약  
Fig 1 Summary of test systems

Test systems	Number of buses	Number of branches	Number of loop system	Power demand
32 Bus	33	37	5	3715 [kW] 2300 [kVar]
69 Bus	70	74	5	3802.19 [kW] 2694.60 [kVar]
148 Bus	149	167	19	44 2928 [MW] 21 5107 [MVar]

표 2은 라우팅 알고리즘으로 수행된 최종 결과에 대한 CTP를 나타낸 것이다. 탐색된 경로의 모선들은 선로교환으로 구성된 계통에서 연속적으로 연계되어 있으며, 순차적으로 전압강하를 나타내는 임계경로를 구성한다. CTP의 말단 모선의 전압페이저의 크기를 임계전압(critical voltage :  $V^{Cr}$ )으로 표현하였으며, 전체 모선중에서 가장 저전압을 나타내는 모선에 이르는 경로를 효과적으로 탐색하였음을 확인할 수 있다.

표 2 임계전송경로에 대한 결과(148모선)  
Fig 2 Result of critical transmission path (148 bus)

Bus No.	Vol.	Bus No.	Vol.	Bus No.	Vol.	Bus No.	Vol.	Bus No.	Vol.
0	1.000	34	0.970	68	0.963	102	0.974	136	0.975
1	1.000	35	0.966	69	0.973	103	0.974	137	0.968
2	1.000	36	0.976	70	0.974	104	0.973	138	0.952
3	1.000	37	0.975	71	0.970	105	0.973	139	0.954
4	1.000	38	0.975	72	0.972	106	0.971	140	0.973
5	1.000	39	0.972	73	0.972	107	0.968	141	0.973
6	1.000	40	0.972	74	0.971	108	0.961	142	0.975
7	1.000	41	0.972	75	0.969	109	0.970	143	0.968
8	0.989	42	0.972	76	0.970	110	0.975	144	0.973
9	0.977	43	0.971	77	0.970	111	0.975	145	0.973
10	0.976	44	0.970	78	0.970	112	0.975	146	0.973
11	0.971	45	0.970	79	0.973	113	0.971	147	0.974
12	0.979	46	0.970	80	0.974	114	0.968	148	0.973
13	0.976	47	0.966	81	0.974	115	0.960		
14	0.973	48	0.975	82	0.970	116	0.972		
15	0.976	49	0.974	83	0.973	117	0.970		
16	0.971	50	0.973	84	0.972	118	0.975		
17	0.970	51	0.971	85	0.968	119	0.975		
18	0.978	52	0.972	86	0.970	120	0.971		
19	0.977	53	0.972	87	0.970	121	0.968		
20	0.976	54	0.969	88	0.970	122	0.955		
21	0.972	55	0.970	89	0.972	123	0.960		
22	0.971	56	0.971	90	0.975	124	0.972		
23	0.976	57	0.970	91	0.974	125	0.970		
24	0.971	58	0.964	92	0.974	126	0.970		
25	0.971	59	0.974	93	0.973	127	0.975		
26	0.968	60	0.975	94	0.973	128	0.968		
27	0.976	61	0.971	95	0.971	129	0.954		
28	0.976	62	0.972	96	0.968	130	0.960		
29	0.976	63	0.972	97	0.968	131	0.960		
30	0.972	64	0.970	98	0.962	132	0.972		
31	0.972	65	0.970	99	0.971	133	0.973		
32	0.971	66	0.970	100	0.975	134	0.970		
33	0.971	67	0.970	101	0.975	135	0.970		
CTP	0, 1, 3, 7, 11, 17, 26, 35, 47, 58, 68, 98, 108, 115, 122, 129, 138								
VSI	0.45796	$\sum P_D^{CTP}$		8271.850	$\sum P_L^{CTP}$		301.763		
$V^{Cr}$	0.95220	$\sum Q_D^{CTP}$		4003.476	$\sum Q_L^{CTP}$		540.238		

그림 3은 제안된 전압안정도 평가 기법의 실효성을 확인하기 위하여 대규모 계통의 CTP 탐색과정을 도시한 것이다. 제안된 VSI는 지역적으로 야기되는 전압불안정 현상에 대한 정확한 위치를 파악할 수 있으며, 임계모선의 전압안정여유에 대한 실시간 평가를 수행할 수 있다.

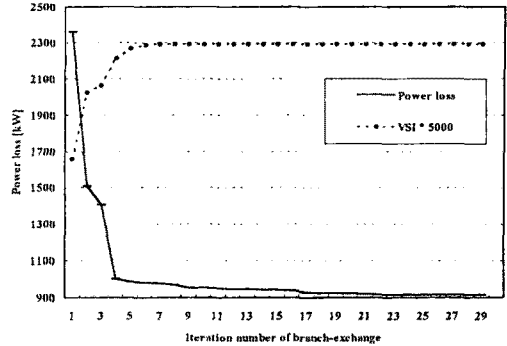


그림 3 선로교환에 따른 전력손실과 VSI 곡선 (148 모선)  
Fig 3 Power loss and VSI curve followed by BE (148 bus)

## 6. 결론

본 논문에서는 방사상 배전계통의 전압안정도를 향상시키기 위하여 새로운 급전선의 최적 라우팅 기법을 제시하였다. 제안된 알고리즘은 계통의 빈번한 구성 상태의 변경에 따른 전압안정도를 신뢰성있는 기법으로 평가하기 위하여 임계전송경로와 임피던스 축약기법에 바탕을 두는 전압안정도 지수를 새롭게 유도하였다. 제안된 전압안정도 지수는 기존의 평가기법과 비교하여 우수한 평가특성을 확인하였으며, 대상계통의 전압안정도의 지역적인 특성을 비교적 정확하게 평가할 수 있다. 또한 전압안정도의 최대 향상을 도모할 수 있는 급전선 최적 라우팅 알고리즘은 대표적인 휴리스틱 탐색전략으로 인정되고 있는 선로교환 기법을 이용하여 지역탐색 알고리즘으로 사용함으로써 탐색시간의 효율 증진과 상대적으로 신속한 계산 성능을 확인하였다.

## 참고 문헌

- [1] Ju, P., Zhou, X.Y., "Dynamic equivalents of distribution systems for voltage stability studies", IEE Proceedings- Generation, Transmission and Distribution, Vol.148, No.1, pp.49-53, Jan. 2001
- [2] Lind, R., Karlsson, D., "Distribution system modelling for voltage stability studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11 No. 4, pp. 1677-1682, Nov. 1996
- [3] F. Gubina, B. Strmcnik, "Voltage collapse proximity index determination using voltage phasors approach", IEEE Transactions on Power System, Vol. 10, No. 2, May 1995.
- [4] A. M. Chebbo, M. R. Irving, M. J. H. Sterling, "Voltage collapse proximity indicator : behaviour and implications", IEE Proceedings-C, Vol. 139, No.3, pp. 241-251, May, 1992
- [5] G. B. Jasmon, L. H. C. C. Lee, "Stability of loadflow techniques for distribution system voltage stability analysis", IEE Proceedings-C, Vol. 138, No.6, pp. 479-484, November, 1991
- [6] Mesut E. Baran, and Felix F. Wu, "Network Reconfiguration In Distribution Systems for Loss Reduction And Load Balancing", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, pp. 1401-1407, April 1989.
- [7] 신중린 외, "휴리스틱 탐색전략을 이용한 배전계통 계획의 급전선 최적 경로 선정", 대한전기학회 논문지, Vol. 49A, No. 11, pp. 566-574, 2000. 11.
- [8] 김재철, 김진오, 신중린, "AI 기법을 이용한 배전계통의 최적라우팅 기법 개발에 관한 연구", EESRI, Final report, 2000.9.
- [9] 신중린 외, "적용 유전알고리즘을 이용한 배전계통 계획의 급전선 최적경로 선정", 대한전기학회 논문지, Vol. 50A, No. 2, pp. 58-66, 2001. 2.
- [10] P. Kundur, , Power system stability and contro, (McGraw-Hill, 1993, pp. 959-1024)