

전압안정도를 고려한 확률론적 도달전력 산정에 관한 연구

논 문
59-8-4

Probabilistic Arrival Power Evaluation considering Voltage Stability

문 승 필[†] · 장 병 훈^{*} · 이 재 걸^{**} · 최 재 석^{***}
(Seung-pil Moon · Byung-hoon Chang · Jaegul Lee · Jaeseok Choi)

Abstract - Purpose of the electric power system planning and operation is to supply the electric energy to customers continuously and economically. With the mutual exclusive laws of nature between reliability and economic, finding the meeting point is very important but not easy. Commonly the probabilistic reliability indices of the electric power systems are represented with negatively. And the effectiveness of FACTS on the probabilistic reliability could not be reflected with common methods. In this paper, a method to evaluate the probabilistic arrival power at each load point is presented. With this new proposed method, probabilistic reserve margin at load points can be calculated and which can be used with positive reliability index also. Using the P-V analysis, the voltage stability is considered in reliability evaluation. It is expected that the proposed method will be useful especially in reliability evaluation of electric power system which has voltage restriction.

Key Words : Voltage Stability, FACTS, Probabilistic Arrival Power

1. 서 론

전력계통의 주 기능은 수요자에게 높은 신뢰도를 가진 양질의 전력을 경제적으로 공급하는 것이다. 각 부하지점에서의 공급신뢰도는 그 부하지점에서 얼마나 안정하고 적절한 전력을 공급받는가 하는 정도를 나타낸다. 그러나 전력계통의 경제성과 신뢰성은 상호 배타적인 성격을 지니고 있어 항상 타협점을 찾아야 한다[1]. 현대사회의 산업은 전력의존도가 높아지고 있을 뿐만 아니라 산업의 경쟁력을 확보를 위한 적절한 신뢰도의 유지가 매우 절실하다. 과거에는 공급신뢰도 수준은 전문가들의 경험이나 판단에 의해 결정되었으나 최근에는 연료비 상승과 정부 및 환경단체 등의 영향으로 보다 상세하고 합리적인 새로운 결정 방법이 요구되고 있다[2]. 본 연구에서는 전압안정도를 고려한 각 부하지점에서의 확률론적 신뢰도를 평가하는 새로운 개념을 도입하였다. 즉, 우리나라의 경우 대규모 발전단지와 대규모 부하지역이 수도권과 비수도권으로 구분되어 전력의 도달수준이 전압안정도에 많은 의존을 하고 있다. 그러므로 전압안정도를 고려한 확률론적 도달전력의 산정은 큰 의미가 있다. 본 연구에서는 각 부하지점의 전력도달 확률을 전압안정도를 고려하여 산출하고 도달전력의 확률론적 분포를 구

하였다. 나아가 최근 복잡해지는 송전망의 다양한 문제들을 해결하기 위해서 계통에 병입되는 최선실비인 FACTS의 확률론적 도달전력 기여도를 분석하여 전압안정도를 고려한 도달전력의 확률분포를 계산함으로써 각 부하지점별 신뢰도 평가에 활용될 수 있도록 하였다.

2. 송전망을 고려한 부하지점별 도달전력 산정

전력계통의 신뢰도 평가에서는 FOR 등과 같은 사고율 관련 데이터, MTBR 등과 같은 사고 지속시간 데이터 등을 입력데이터로 한다. 그리고 전력계통 신뢰도 평가의 결과로 공급지장 시간, 공급지장 빈도, 공급지장 전력량 등을 얻게 된다. 전력계통을 계획하고 운영함에 있어 소비자들에게 전력을 완전하게 공급하기는 불가능하다. 그러므로 전력계통의 우발적 사고를 고려하여 공급지장이 발생할 확률에 대한 연구와 대책을 수립하는 것은 중요한 일이다. 전력소비자 측면에서는 공급지장 발생 확률을 예측하고 그에 대한 적절한 조치를 취함으로써 전력소비자들에 불가피하게 부담하는 공급지장비용을 최소화할 수 있다. 반면 공급자 측면에서는 각 부하지점에서 확률론적 공급능력을 평가할 수 있다면 전력계통의 계획과 운영에 있어 중요한 정보를 얻을 수 있다[4]. 송전망의 불확실성을 고려한 전력계통 신뢰도 평가를 위해서는 각 부하지점별 전력공급 적정성을 구해야 한다. 그 적정성을 평가하는 방법으로는 조류계산, 비선형계획법을 이용한 최적조류계산, 유량법, DC조류법을 이용한 선형계획법 등이 사용된다.

조류계산을 이용할 경우 발산의 문제로 각 부하지점별 적

† 정 회 원 : KEPCO 전력연구원 송배전연구소 선임연구원
E-mail : spmoon@kepco.co.kr
* 정 회 원 : KEPCO 전력연구원 송배전연구소 책임연구원
** 정 회 원 : KEPCO 전력연구원 송배전연구소 선임보연구원
*** 정 회 원 : 경상대학교 교수
접수일자 : 2010년 5월 17일
최종완료 : 2010년 7월 20일

정성을 구하기가 곤란하다. 최적조류계산의 경우 일반적인 개념의 연료비 최소 또는 손실최소를 목적함수로 사용하지 않고 각 부하지점별 최대전력의 합을 최대로 하는 목적함수를 이용하여 각 부하지점별 적정성을 구할 수 있다. 유량법 또는 최대원리법을 이용할 경우 그 구성은 간단하나 송전망의 특성을 반영하기에는 부족함이 있다. DC 조류법을 활용한 선형계획법을 이용하여 각 부하지점별 적정성을 구하는 경우 DC 조류법은 선형의 성질을 가지고 있으므로 선형계획법에 고려하기가 매우 편리하다. 그리고 다양한 목적함수를 고려한 도달전력 산출이 가능하다[5,6]. 이때 각 부하지점별 최대도달전력의 합을 최대로 하는 목적함수와 최소도달전력을 최대로 하는 목적함수를 설정하고 전력수급, DC조류, 발전기 상·하한, 최대부하 등을 제약조건으로 설정할 수 있다. DC 조류법에 의하여 도달전력을 산정하는 식을 선형계획법으로 정식화하면 그 목적함수와 제약조건은 식(1)~(3)과 같다.[4,5,8] 그러나 실제 전력계통의 계획 및 운영의 관점에서의 계통특성을 반영하기에는 한계가 있다.

Minimize λ

Subjective to

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq CG_i \quad i \in B_B$$

$$-CT_{jmax} \leq x_j \leq CT_{jmax} \quad j \in B_T$$

$$(L_k - x_k)/L_k \leq \lambda \quad k \in B_L \quad (1)$$

단, B_T : 송전선로 집합
 B_B : 모든 모선 집합
 B_L : 부하를 갖는 모선 집합
 CT_{jmax} : j 번째 선로의 송전용량[MW]
 a_{ij} : 절점-지로 접속행렬의 i행 j렬의 요소
 n : 지로의 수 (부하지점 및 송전선로의 수)
 x_j : 선로의 조류 [MW]
 x_k : 부하모선에서의 도달전력 [MW]
 λ : max-min을 위한 매개변수

Maximize x_k

Subjective to

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq CG_i \quad i \in B_B$$

$$-CT_{jmax} \leq x_j \leq CT_{jmax} \quad j \in B_T$$

$$x_k \geq 0 \quad k \in B_L \quad (2)$$

단, B_T : 송전선로 집합
 B_B : 모든 모선 집합
 B_L : 부하를 갖는 모선 집합
 CT_{jmax} : j 번째 선로의 송전용량[MW]
 a_{ij} : 절점-지로 접속행렬의 i행 j렬의 요소
 n : 지로의 수 (부하지점 및 송전선로의 수)
 x_j : 선로의 조류 [MW]
 x_k : 부하모선에서의 도달전력 [MW]

Minimize $\sum_{i \in NC} \{ W_i \sum_{k=1}^{MS} \beta_k C_{ij} \}$

Subjective to

$$T(S^j) = \sum_{k=1}^{NS} A_{ik}(S^j)(PG_k + \sum_{j=1}^{MS} C_{kj} - PD_k)$$

$$(i = 1, \dots, L)$$

$$\sum_{i \in NG} PG_i + \sum_{i \in NC} \sum_{j=1}^{MS} C_{ij} = \sum_{i \in NC} PD_i$$

$$PG^{\min} \leq PG \leq PG^{\max}$$

$$0 \leq C_{ij} \leq \alpha_j PD_i \quad (i \in NC; j = 1, \dots, MS) \quad (3)$$

$$|T(S^j)| \leq T^{\max}$$

단, L : 선로수
 NS : 모선수
 MS : 부하 모선의 특정부하 수 (2 or 3)
 α_j : 특정부하 비율
 β_j : 특정부하의 가중치
 W_i : 부하모선의 가중치
 $T(S^j)$: j 상정고장시의 조류
 A_{ik} : 직류법 조류계산 매트릭스
 PG_k : k모선의 발전력
 PD_k : k모선의 부하
 C_{kj} : k모선의 j특정부하 차단량

3. 전압안정도를 고려한 확률론적 도달전력

3.1 전압안정도

전력전송을 증가시키에 따라 전력전송 부담이 높은 지역을 중심으로 전압은 낮아지게 되고 결국에는 전압붕괴가 발생한다. 이러한 현상은 다음 그림과 같은 단순 네트워크로 보여줄 수 있다.[7]

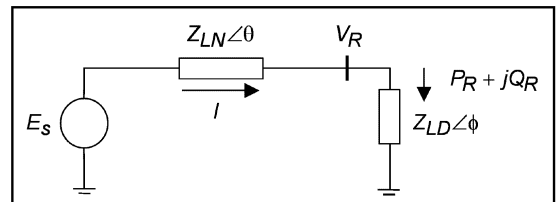


그림 1 P-V 설명을 위한 2모선
 Fig. 1 2Bus system to explain P-V analysis

수전단 전압을 V_R , 전류를 I , 유효전력을 P_R 라 할 때, E_s 의 역률 및 선로의 파라메타가 고정된 상태에서 부하 임피던스 Z_{LD} 가 낮아짐(전력수요 증가)에 따라 부하전력 P_R 는 처음에 급격히 증가하고 최대점($Z_{LD}/Z_{LN} = 1$)에 도달하기 전에 서서히 감소되다가 마지막에 급격히 감소하게 된다. 부하가 최대전력 이상으로 증가하게 되면 계통은 불안정해지고 결국에 전압붕괴가 일어난다. 그림 1의 전압, 전류 유효전력의 관계를 수식으로 표현하면 식(4)와 같고 수전단의 전력증가에 따른 전압을 보이면 그림 2와 같다.

$$I = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{E_s}{Z_{LN}}$$

$$V_R = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} E_S \quad (4)$$

$$P_R = \frac{Z_{LD}}{F} \left(\frac{E_S}{Z_{LN}} \right)^2 \cos\phi$$

$$F = 1 + \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} \right) \cos(\theta - \phi)$$

단, V_R : 수전단 전압

I : 전류

P_R : 유효전력

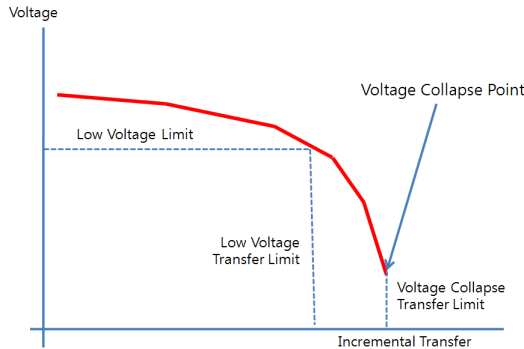


그림 2 전력 전송량 증가에 따른 전압(P-V Curves)

Fig. 2 Concept of P-V Curve

3.2 전압안정도를 고려한 확률적 도달전력 산출

P-V 해석은 전력시스템이 정상상태 및 상정고장시의 전압안정도를 유지할 수 있는 능력을 산정하는 것이 주요 목적이지만 P-V해석을 통해 각 부하지점별 최대도달전력을 산출할 수 있다. 본 연구에서는 P-V해석을 통하여 전압안정도 및 송전망의 불확실성을 고려한 각 부하지점별 도달전력 및 도달전력의 확률밀도분포를 구한다.

DC조류법을 이용한 선형계획법의 경우 각 모선의 전압차를 무시하고 동일하다는 가정 하에 위상각으로만 조류를 관찰하기 때문에 전압안정도의 영향을 평가할 수 없다는 단점이 있다. 그러므로 발전설비의 전기적 위치에 따른 영향이나 무효전력설비 등의 영향 특히, 최신전력전자기술을 이용한 FACTS설비 등으로 인한 전압안정도향상에 따른 각 부하지점에서의 도달전력 향상 수준을 평가하기가 곤란하다. 특히 식(1) 또는(3)에서 보인바와 같이 각 상정고장(발전기 및 송전망)에 의한 부하공급전력을 산출할 경우 그림 3에서 보인바와 같이 완전한 Cumulative Density Function of Arrival Power(CDFAP)를 구할 수 없고 최대부하를 공급하지 못하는 공급지장발생확률만을 구할 수 있다. 식 (2)와 같이 부하공급량의 합을 최대로 하는 경우는 실제 전력계통의 특성 및 운영특성을 반영하기 곤란하다. 그러므로 이러한 전력계통의 특성을 고려한 확률론적 신뢰도 평가가 필요하다. 특히, 우리나라 전력계통의 경우 전압안정도 제약에 따른 수도권 유입전력의 문제가 심각하며 이에 따라 비수도권의 저가발전을 충분히 활용하지 못하고 수도권 고가발전기를 운전해야 하는 송전제약발전을 행하고 있어 전압안정도에 따른 영향을 충분히 고려할 필요가 있다.

본 연구에서는 부하지점별 확률론적 도달전력산출을 산출

하기 위하여 P-V 해석을 이용하였다. 일반적으로 P-V 해석에서 정상상태 및 상정고장시의 특정지역 또는 전체 발전력을 증가시킴과 동시에 특정지역 또는 전체부하를 증가시켜 각 모선 전압을 관찰한다. 본 연구에서는 각 부하지점의 확률론적 도달전력을 산출하기 위하여 각 부하지점의 부하를 zero에 가깝게 두고 전체 발전력을 증가시켜 특정 부하의 도달전력을 계산하였다. 그리고 각 송전망의 상정고장에 따른 도달전력 가능 정도를 파악하고 그 사고확률을 도달전력별로 누적하여 확률론적 도달전력을 산출하였다. 그 순서도는 그림 3과 같다.

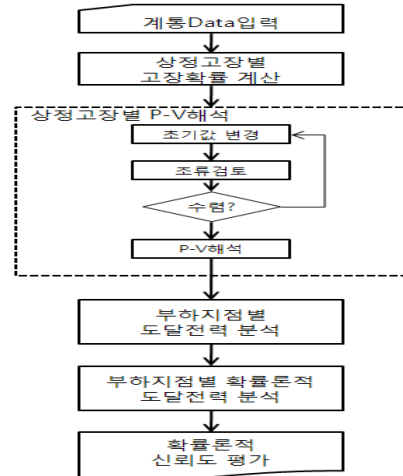


그림 3 확률론적 도달전력 산출 순서도

Fig. 3 Flow chart for arrival power calculation

부하지점 i 에서의 부하변수를 P 라 하고 부하의 특정 값을 p 라 하면 지속시간을 $T_i(p)$, Normalizing LDC(Load Duration Curve)는 지속시간 비율로 $ti(p)$ 라 표현된다. (단, $P \geq p$, 1년의 LDC를 고려할 경우 $ti(p) = T_i(p)/8760$) 그리고 각 부하지점별 도달전력 확률분포의 산출이 가능하다면 다음 그림과 같이 부하지점의 도달전력 누적확률함수를 구할 수 있을 뿐만 아니라 부하지점의 신뢰도 지수도 산출가능하다. 부하지점에서 발전기 및 송전망의 사고확률이 zero이고 부하를 충분히 공급할 수 있으면 부하지점 i 에서의 도달전력확률밀도함수(Cumulative Density Function of Arrival Power(CDFAPi))는 특정 수준에서 1값을 가지게 된다. 만일 그림 4의 Arrival Power w/o Outage과 같이 Arrival Power(AP)가 최대부하 보다 크다면 부하차단 없이 공급할 수 있을 것이고 도달전력이 그림 4의 Arrival Power w/ Outage와 같이 최대부하 보다 작으면 공급지장이 발생할 것이다. 발전계통 및 송전망의 사고확률을 고려하게 되면 CDFAPi는 그림 4에서 보이는 점선의 커브를 그리게 되고 Normalized Load Duration Curve(NLDCi)의 교점이 부하공급지장 확률이 된다. 그러므로 각 부하지점에서의 확률론적 도달전력을 계산하게 되면 CDFAPi를 구할 수 있고 이로써 각 부하지점별 신뢰도 지수도 구할 수 있다. 예로써 NLDCi와 CDFAPi의 교점의 확률값은 부하차단 가능 기대 확률값 (Probability that Load is Expected to be Shed) 이 된다.

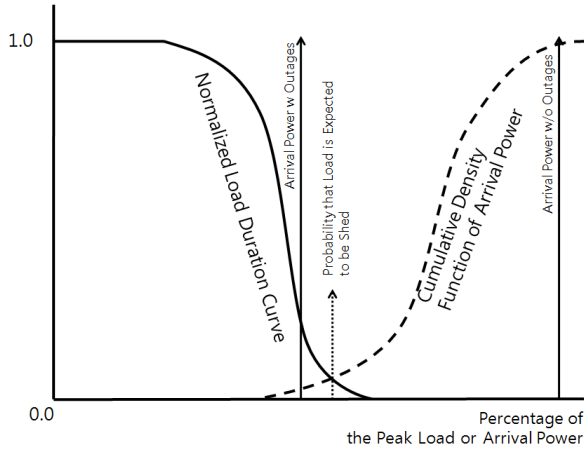


그림 4 Normalized Load Duration Curve 및 Cumulative Density Function of Arrival Power
 Fig. 4 Normalized Load Duration Curve and Cumulative Density Function of Arrival Power

4. 사례 연구

본 연구의 유용성을 살펴보기 위하여 IEEE 24 Buses Reliability Model을 이용하였다. IEEE 24Buses Reliability Model의 특성을 간단히 살펴보면system의 계통도를 보이면 그림 5와 같다.

4.1 IEEE RTS

IEEE RTS의 송전망 정보 및 부하정보는 표.1~2 와 같다. 본 연구에서는 연구의 특성상 발전계통의 불확실성은 고려치 않았기 때문에 발전계통의 불확실 자료는 제외한다.

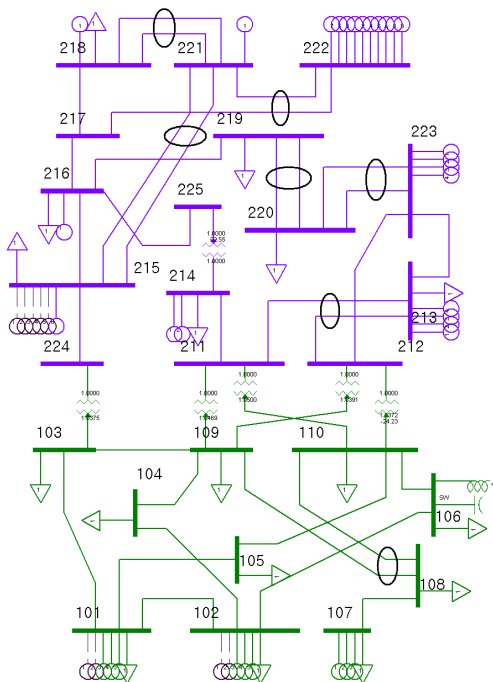


그림 5 IEEE 24모선 시스템 구성
 Fig. 5 IEEE 24Buses Model System

표 1 송전선로 공장 및 고장데이터

Table 1 Transmission Line Length and Forced Outage Data

From Bus	To Bus	Length (miles)	Permanent		Transient Outage Rate (occ/yr)
			Outage Rate (occ/yr)	Outage Duration (hr)	
101	102	3	0.24	16	0.0
101	103	55	0.51	10	2.9
101	105	22	0.33	10	1.2
102	104	33	0.39	10	1.7
102	106	50	0.48	10	2.6
103	109	31	0.38	10	1.6
103	224	0	0.02	768	0.0
104	109	27	0.36	10	1.4
105	110	23	0.34	10	1.2
106	110	16	0.33	35	0.0
107	108	16	0.30	10	0.8
108	109	43	0.44	10	2.3
108	110	43	0.44	10	2.3
109	111	0	0.02	768	0.0
109	112	0	0.02	768	0.0
110	111	0	0.02	768	0.0
110	112	0	0.02	768	0.0
111	213	33	0.40	11	0.8
111	214	29	0.39	11	0.7
112	213	33	0.40	11	0.8
112	223	67	0.52	11	1.6
213	223	60	0.49	11	1.5
214	216	27	0.38	11	0.7
215	216	12	0.33	11	0.3
215	221	34	0.41	11	0.8
215	221	34	0.41	11	0.8
215	224	36	0.41	11	0.9
216	217	18	0.35	11	0.4
216	219	16	0.34	11	0.4
217	218	10	0.32	11	0.2
217	222	73	0.54	11	1.8
218	221	18	0.35	11	0.4
218	221	18	0.35	11	0.4
219	220	27.5	0.38	11	0.7
219	220	27.5	0.38	11	0.7
220	223	15	0.34	11	0.4
220	223	15	0.34	11	0.4
221	222	47	0.45	11	1.2

표 2 모선별 부하데이터

Table 2 Bus demand data

Bus Number	Pload (MW)	Qload (Mvar)
101	108	22
102	97	20
103	180	37
104	74	15
105	71	14
106	136	28
107	125	25
108	171	35
109	175	36
110	195	40
213	265	54
214	194	39
215	317	64
216	100	20
218	333	68
219	181	37
220	128	26

4.2. Case Study 1 (FACTS 투입전)

○ 각 부하지점별 도달전력 확률분포

각 부하지점별 도달전력 확률분포를 구하기 위하여 각 상정고장에 대하여 발전량과 부하를 증가시키는 방법으로는 전체부하를 증가시키면서 전체발전량을 증가시키는 방법 그리고 특정 부하지점의 부하를 증가시키면서 전체부하를 증가시키는 방법 등 다양한 P-V해석방법을 고려할 수 있다. 본 연구에서는 각 부하지점의 부하증가에 따른 상정고장별 전압안정도영향을 평가하는 것을 목표로 각 부하지점별로 부하를 zero에서 점차 증가시키면서 전력수급을 맞추기 위해 전체발전량을 증가시키는 방법을 사용하였다. 표 3-1~3-4는 각 부하지점별 상정고장에 대한 도달전력 확률을 보인 것이다.

표 3-1 각 부하지점별 도달전력 확률분포

Table 3-1 Nodal arrival power distribution of case 1

부하지점 도달전력	101	102	103	104	105
20		4.61573E-05			
40			0.001082965	4.61573E-05	
60			4.33453E-07	0.000287678	0.000166446
80	0.000166446		0.000747823	0.050274639	0.000206169
90	0.000161551	0.000176237			
100	0.000607199	0.006790144	0.024406024		0.022232034
105					
110					0.000488531
115					
120	0.006006788	8.01343E-08	0.02498204	0.000350172	0.022250835
140	0.009676829	0.009757891	0.033528527	0.015780777	0.00137461
150					
160	0.000151697		2.2133E-10	0.83525332	0.014861654
170					
180	0.00196059	0.00234603	0.029357229		0.000576547
190	0.001886716	0.001548928			8.19224E-07
200	0.002399366	0.004446997	0.787887702		0.839834458
210	0.001448081				
220	0.044449735	0.057850621			6.40522E-07
230	0.001196559	0.019410669			
240	0.126724891	0.100036564			
245					
250		3.09058E-07			
260	0.705156295	0.699582114			
270					
280					
300					
320					
340					
360					
380					

표 3-2 각 부하지점별 도달전력 확률분포

Table 3-2 Nodal arrival power distribution of case 1

부하지점 도달전력	106	107	108	109	110
20	0.006410476				
40					
60					
80					
90					
100			0.000135769		
105			3.7396E-07		
110		0.00083158	0.000517336		
115			3.7396E-07		

120	0.001790958	0.05812151	0.058299237	2.2133E-10	
140	0.030844191	0.006140018	0.000101626	4.61573E-05	
150		0.003926911			
160	0.000330322	0.832972724	0.018102346	3.31464E-07	8.01343E-08
170	0.000561024				
180	0.169821617		0.824835681	0.000621096	8.03556E-08
190	0.01836699				
200	0.673867166			1.63182E-06	0.000101827
210					
220				0.001047131	0.000241679
230					
240				0.003060294	0.000480221
245					3.09058E-07
250					3.7396E-07
260				0.027452235	0.007521138
270					9.54107E-07
280				0.012602857	0.009181922
300				0.075505207	0.028441602
320				0.136570005	0.112846763
340				0.645085798	0.150758525
360					0.591768128
380					0.00064914

표 3-3 각 부하지점별 도달전력 확률분포

Table 3-3 Nodal arrival power distribution of case 1

부하지점 도달전력	213	214	215	216
140		0.000367133		
180		0.020575158		
200		0.001409836		
220		0.022592244		
240				
260		3.09058E-07		
280		0.000112206	0.000729871	
300		0.024384707		
320		0.001873888		0.00031153
340		0.140102725	0.000685366	
350			0.00036519	
355			0.00031153	
360		0.690574538	0.000372056	
365				
380			0.016425273	
400			0.002229637	0.000614429
405				2.62699E-07
410				
415			0.0003118	
420			2.62699E-07	0.000605798
425				
430				0.000357653
440				
445			0.00073391	
450			0.001063788	
455				
460			0.001699957	0.0003118
470			0.00127838	0.000682939
475				0.000742817
480			0.01659313	0.001422621
490				0.001230956
500	0.901992743		0.859192592	0.895711937

표 3-4 각 부하지점별 도달전력 확률분포

Table 3-4 Nodal arrival power distribution of case 1

부하지점 도달전력	218	219	220
140			
180			
200		0.000696965	0.0003118

220		0.001072959	
240		0.002002202	
260		0.017510451	
280		0.00070128	0.001072959
300			0.00047687
320			0.000366823
340		0.00031153	0.019365924
350			
355			
360	0.00160782		0.00038948
365	0.00031153		
380			
400	0.001368575	0.000284828	
405			
410	0.000293459		
415	0.000312063		
420	0.000774105	0.001393929	
425	0.000320971		
430			
440	0.018948531	0.0012472	0.003397163
445			
450	0.001765068		
455	0.000376257		
460	0.021961455	0.005655271	0.00411058
470	0.015960359		
475			
480		0.073651664	0.009525921
490			
500	0.83799255	0.797464465	0.862975222

230kV 지역은 충분한 발전력으로 무효전력 수급이 원활하여 전반적으로 최대 도달전력이 키고 확률분포도 우수하다. 반면 138kV 지역은 발전력의 부족으로 최대 도달전력 수준이 낮고 확률분포도 최대부하 부근에 존재한다.

4.3 Case Study 2 (FACTS 100MVar 설치)

106모선에 FACTS 설비 100MVar를 추가하였을 경우 각 부하지점별 도달전력 확률분포는 표 4-1~4-3과 같다.

표 4-1 각 부하지점별 도달전력 확률분포

Table 4-1 Nodal arrival power distribution of case 2

부하지점 도달전력	106	07	108	109	110
40					
60	4.61573E-05				
70	0.000110778				
80	0.006253541				
90					
100			0.000135769		
105					
110		0.000696185	0.000516962		
115					
120		0.031782545	0.058299985	2.2133E-10	
125		0.026473238			
130		1.12188E-06			
140		0.006139686	0.000102		
150	4.07956E-07	3.31464E-07			
160	0.00051737	0.836899635	0.006039029		
180	0.03211737		0.836899898	0.000621427	8.01343E-08
185	2.2133E-10				
190					
195	3.7396E-07				
200	0.000163502			1.63182E-06	0.000101626
210	0.000176952				
220	0.062366728			0.001047131	0.000104623
225					

230	0.514989656				
240	0.285249908			0.002150981	0.000135964
250					
260				0.026145335	0.000716072
265					
270					4.07956E-07
280				0.008684338	0.005355407
290					2.48968E-06
300				0.071761592	0.00227637
305					2.2133E-10
310					0.000422685
315					1.06239E-06
320				0.129102057	0.022290306
340				0.662478251	0.027279712
350					0.000569655
360					0.079784184
370					0.000575451
380					0.110488716
400					0.65188792

표 4-2 각 부하지점별 도달전력 확률분포

Table 4-2 Nodal arrival power distribution of case 2

부하지점 도달전력	213	214	215	216
140		0.000367133		
180		0.020208025		
200		0.001776968		
220		0.022592244		
240				
260		3.09058E-07		
280		0.000112206	0.000729871	
300		0.006318034		
320		0.019165931		0.00031153
340		0.067240606	0.000685366	
350			0.00036519	
355			0.00031153	
360		0.764211287	0.000372056	
365				
380			0.016895239	
400			0.001759671	0.000614429
405				2.62699E-07
410				
415			0.0003118	
420			2.62699E-07	0.000605798
425				
430				0.000357653
440				
445			0.000733647	
450			0.000312063	
455				
460			0.002068615	0.0003118
465			0.000383331	
470			0.00095741	0.000293459
475				0.000375994
480			0.0169141	0.001664454
490				0.001745426
500	0.901992743		0.859192592	0.895711937

표 4-3 각 부하지점별 도달전력 확률분포

Table 4-3 Nodal arrival power distribution of case 2

부하지점 도달전력	218	219	220
140			
180			
200		0.000696965	0.0003118
220		0.001072959	
240		0.000938806	
260		0.018573848	

280		0.00070128	0.001072959
300			0.00047687
320			
340			0.019732748
350			
355			
360	0.00160782	0.00031153	0.00038948
365	0.00031153		
380			
400	0.001368575	0.000284828	
405			
410	0.000293459		
415	0.000312063		
420	0.000774105	0.001393929	
425	0.000320971		
430			
440	0.018948531	0.0012472	0.003397163
445			
450	0.000641941		
455	0.000376257		
460	0.023084582	0.005290335	0.00411058
465			
470	0.015960359		
475			
480		0.048581493	0.007690185
490			
500	0.83799255	0.822899571	0.864810958

존재하게 된다. 이는 해당 부하의 최대도달전력이 상승하고 있음을 보이는 것이라도 사료된다.

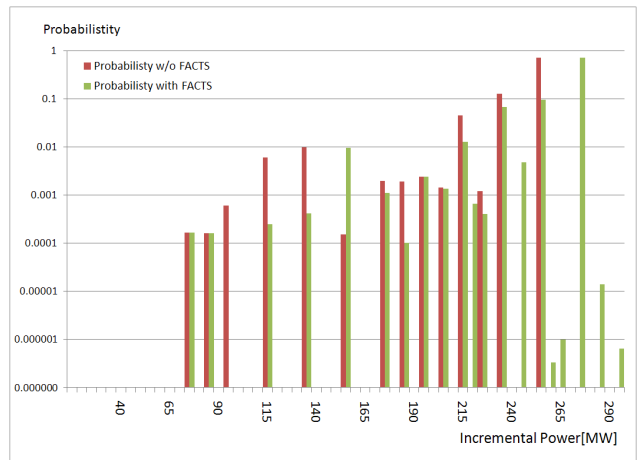


그림 7 FACTS투입에 따른 도달전력의 확률분포 향상
Fig. 7 Probabilistic distribution of arrival power improvement with FACTS

4.4 FACTS의 도달전력 향상

P-V 해석을 통해서 전압안정도를 고려한 FACTS설비의 확률론적 도달전력 영향을 평가한 결과 그림 6에서 보인바와 같이 FACTS설비의 투입에 따라 부하모선의 전압안정도가 향상되고 최대도달전력이 향상된다.

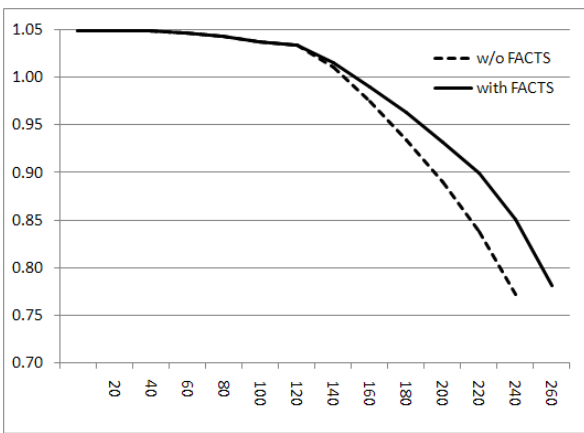


그림 6 FACTS투입에 따른 부하모선의 P-V Curve 향상
Fig. 6 P-V curve improvement with FACTS

그림 6에서 보인 바와 같이 FACTS 투입에 따라 부하모선의 전압안정도가 향상되면 부하모선에서의 CDFAP가 그림 7과 같이 향상된다. 그림 7은 낮은 확률을 잘 관찰할 수 있게 하기 위하여 확률축(y축)을 로그로 표시하였다. FACTS설비의 투입이 없는 경우는 90MW~140MW 및 215MW~250MW에서 높은 확률분포를 보이는 반면 FACTS설비가 투입됨에 따라 260MW 이상에서 확률분포가

그림 7의 확률분포를 누적하여 CDFAP로 보이면 그림 7과 같다. 그림 8에서 NLDC와의 교점은 해당 부하모선의 공급지장확률이 된다. 그림 8에서 FACTS를 투입한 경우 공급지장확률이 낮아짐을 볼 수 있다. 모선별 그 상세 결과는 표 5에서 보인다. 모선 106에 100MVA FACTS설비가 투입됨에 따라 신뢰도 수준이 양호한 106모선에 비해 인근의 138kV지역 중 확률론적 공급신뢰도가 다소 낮은 103, 107 및 108모선의 신뢰도가 많이 향상됨을 확인할 수 있다. 일반적으로 무효전력보상설비로 인하여 전압안정도가 국지적으로 향상되고 있으며 표 5는 이를 잘 반영하고 있다고 사료된다.

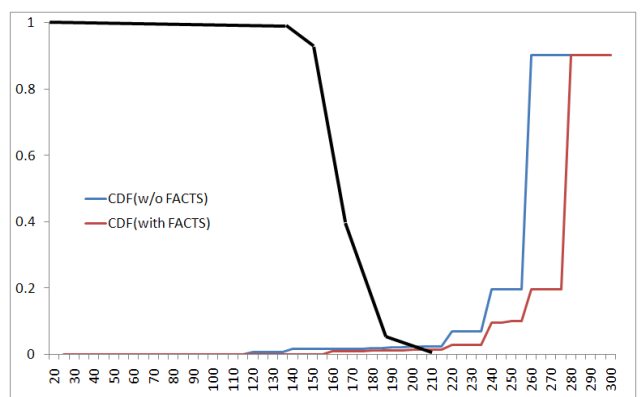


그림 8 Normalized Load Duration Curve와 FACTS투입에 따른 도달전력 확률밀도 향상
Fig. 8 Normalized load duration curve and improvement with FACTS

표 10 FACTS 투입에 따른 부하지점별 공급지장확률
Table 10 Probability of unserved load with FACTS

부 하 지 점	최대부 하 [M W]	공급지장확률		
		FACTS 투입전(a)	FACTS 투입후(b)	차
101	108	0.000935	0.000328	0.000607
102	97	0.000222	0.000000	0.000222
103	180	0.114105	0.084748	0.029357
104	74	0.000334	0.000177	0.000157
105	71	0.000166	0.000166	0.000000
106	136	0.008201	0.006410	0.001791
107	125	0.058953	0.032479	0.026474
108	171	0.077157	0.059055	0.018102
109	175	0.000046	0.000000	0.000046
110	195	0.000000	0.000000	0.000000
213	265	0.000000	0.000000	0.000000
214	194	0.020942	0.020575	0.000367
215	317	0.000730	0.000000	0.000730
216	100	0.000000	0.000000	0.000000
218	333	0.000000	0.000000	0.000000
219	181	0.000000	0.000000	0.000000
220	128	0.000000	0.000000	0.000000

5. 결 론

본 연구에서는 P-V 해석방법을 통한 각 부하지점별 도달 전력 확률분포를 구하고 누적확률밀도를 구함으로써 전압안정도를 고려한 각 부하지점별 신뢰도평가 가능성을 보였다. 제안된 방법을 이용하면 전압안정도 향상을 위하여 계통에 투입되는 FACTS의 신뢰도 향상 수준을 파악할 수 있다. 그리고 도달전력의 확률분포를 각 부하지점별로 구함으로써 부하의 불확실성에 따른 전력공급가능 여부를 즉시 판단할 수 있는 자료로 활용될 수 있다. 각 부하지점별 확률론적 도달전력을 산정함으로써 각 부하지점별 전력공급여유를 확률론적으로 평가할 수 있다. 본 연구는 특히 우리나라 전력계통과 같이 전압안정도에 의한 송전제약의 영향이 큰 전력계통의 계획 및 운용에 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] Roy Billinton & Ronald N. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", Plenum Press, 1984.
 [2] Harry G. Stoll, "Least-Cost Electric Utility Planning" John Willy & Sons, 1989
 [3] Roy Billinton & Ronald N. Allan, "Reliability Assessment of Large Electric Power System" Kuwer Academic Publishers, 1988
 [4] 문승필, 장병훈, 김기일 "부하지점에서의 확률론적 공급 능력 평가", 2007년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2007.
 [5] 문승필, 김홍식, 최재석 "Monte Carlo Simulation을 이용한 각 부하지점별 확률론적 발전비산정" 대한전기학

회 논문집 51A-9-2, 2002

[6] 김홍식, 문승필, 최재석, 노대석, 차준민 " 각 부하지점별 확률론적 발전비용 산정을 위한 수치해석적 방법의 개발", 대한전기학회 논문집 50A-9-6, 2001
 [7] P.Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Inc., 1993
 [8] Roy Billinton & Wenyuan Li, "Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods", Plenum Press · New York and London, 1994

저 자 소 개



문 승 필 (文勝必)

1970년 3월 5일생. 1996년 2월 경상대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2002년 9월~현재 한전 전력연구원
 Tel : 042-865-5823
 E-mail : spmoon@kepco.co.kr



장 병 훈 (張秉勳)

1964년 3월 1일생. 1989년 고려대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한전 전력연구원 책임연구원
 Tel : 042-865-5820
 E-mail : jang7@kepri.re.kr



이 재 걸 (李宰杰)

1976년 8월 19일생. 2002년 인천대 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년~현재 한전 전력연구원 근무
 Tel : 042-865-5805
 E-mail : jaelry@kepco.co.kr



최 재 석 (崔在錫)

1958년 4월 29일생. 1981년 고려대 전기공학과 졸업. 1990년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1991년~현재 경상대 교수
 Tel : 055-751-5347
 E-mail : jschoi@gnu.ac.kr