

최적전압조정을 위한 ULTC와 SVR의 협조방안에 관한 연구

김미영, 노대석
한국기술교육대학교

A Study on the Cooperation Program between ULTC and SVR for the Optimal Voltage Regulation

Mi-Young Kim, Dae-Seok Rho
Korea University of Technology and Education

Abstract - 최근 생활수준의 향상과 정보통신 산업의 급속한 발전으로 인하여 전세계적으로 전력품질에 대한 관심이 높아져, 각종 전력품질 개선장치로부터 최적 공급시스템에 이르기까지 다양한 각도에서 전력품질을 향상하기 위한 연구개발이 수행되고 있으며, 특히 정보통신기기 및 정밀제어기기 등의 보급증가로 전압품질에 대한 관심이 높아져가고 있다. 지금까지 배전계통의 전압 관리는 배전용 변전소 ULTC(Under Load Tap Changer)와 고압배전선로의 주상변압기에 의해 조정되어 왔으며 최근에 고압배전선로의 전압강하가 5%를 초과하는 선로에 대한 효율적 전압관리를 위해 선로전압조정장치(SVR- Step Voltage Regulator)가 도입되고 있다. 그러나 배전용 변전소 ULTC와 고압배전선로의 SVR이 서로 독립적으로 운용되고 있기 때문에 SVR의 효율성이 떨어지고 있는 실정이다. 그러므로 본 논문에서는 변전소 ULTC와 SVR 송출전압의 최적 전압조정을 위한 협조운용 방안을 제시하고자 한다.

전압과 총 부하전류 사이의 관계에 따른 통계적 해석에 의해서 최적 정정치를 얻는다.

2.1 최적 보상율

배전용 변전소에서 송출전압은 일반적으로 그림 1에서 보여진 것처럼 몇몇 고압피더를 가지는 부하비율변압기(LRT)에 의해서 조정된다. 그러나 전압조정법은 부하특성이 다른 몇몇 피더를 고려할때 어려워지고 분산형 전원 계통의 운전에 의해서 더 복잡해진다.

본 논문은 가장 큰 전압강하와 분산형전원 계통의 운전에 따른 전압변동을 가지는, 가장 조건이 나쁜 피더에 대하여 제안하고, 만약 이 피더를 통한 모든 수용가들이 허용전압 범위안에 유지되고, 또한 적당한 전압 분포를 가진다면, 같은 बैं크에서 어떤 다른 피더들의 수용가 전압도 적당한 전압 분포를 가지게 된다. 그러므로, 배전용 변전소에서 최적 송출전압을 결정하는 것은 LRT의 가장 적당한 전압보상율을 알아내는 것이고 다음처럼 공식화 될 수 있다.

1. 서 론

산업발전과 생활수준의 향상과 함께 전력 서비스에서 더 나은 품질이 요구된다. 또한 부하를 악화와 전지구적 환경문제에 대한 대책의 하나로써 태양광, 연료전지, 2차전지와 같은 분산형전원이 배전계통과 서로 연결되어 있다. 이러한 환경하에서, 가능한 많은 수용가에게 적당한 전압을 보내기위하여, 배전계통에서 새로운 최적 전압조정 방안의 개발이 요구되고 있다.

뱅크 선로전압강하보상(LDC) 수법은 허용범위 안에서 수용가 전압을 유지하기 위하여 많은 발전소에서 주로 사용되고 있다. 이 수법은 전체피더 특성을 대표하는 임의의 표준피더의 개념에 기초한다. 그러나 임의의 부하 변화와 피더 배치를 고려한 표준피더를 가지고 LDC 정정치를 결정하는 것은 어렵다. 더욱이, 배전계통과 상호 연결된 분산형전원은 전압조정을 매우 복잡하게 만든다.

그래서 본 논문에서는 효율적인 전압관리를 위하여 최적 전압조정 LDC값을 산정하는 알고리즘을 제시하고자 한다. 구체적으로 말하면, 분산형전원의 운전특성과 수용가 전압조건을 고려하기 위하여 기존의 LDC 수법의 통계적 해석에 기초한 최적 전압조정법을 제시하고 또한 quasi-Newton 반복법에 의해서 다수 전압조정기의 최적운용을 제안한다. 제안된 수법의 유효성을 증명하기 위하여 모델 배전계통을 가지고 시뮬레이션을 수행하여 제안한 알고리즘의 유효성을 확인한다.

2. 분산형전원을 고려한 최적 전압조정방안

LDC 수법에 의한 배전용 변전소에서 최적 송출전압 결정문제는 가능한 많은 수용가에게 적당한 전압을 보내기 위하여 최적 LDC 정정치를 알아내는 것이다. 본 논문은 우선 기존 수법에 기초한 모방수법에 의한 이상적 최적 송출전압을 결정하고, 그 다음에 이상적 최적 송출

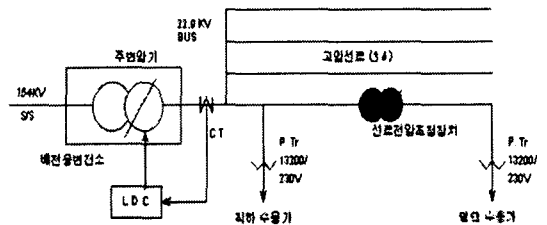


그림 1 배전계통의 전압조정

$$\text{Min } J(t) = (V1_{\text{max}}(t) - V1(t) \cdot X_{\text{mtr}}/R_{\text{mtr}})^2 + (V1(t) \cdot X_{\text{mtr}}/R_{\text{mtr}} - V1_{\text{min}}(t))^2 \quad (1)$$

Subj. to,

$$V1_{\text{max}}(t) = V_{\text{max}} \quad (2)$$

$$V1_{\text{min}}(t) = V_{\text{min}} \cdot V1(t)/V2(t) \quad (3)$$

여기서, t : 시간대,
V1(t), V2(t) : LRT 직하, 말단의 수용가전압
V1max(t), V1min(t) : LRT 직하로 환산된 허용전압의 상하한치
Vmax, Vmin : 허용전압의 상하한치
Rmtr : LRT의 전압보상율
Xmtr : LRT의 최적 전압보상율

이 전압보상율은 기준 송출전압 22,900V에 대한 송출전압의 비율을 나타낸다. 따라서 송출전압은 전압보상율에 기준 송출전압을 곱함으로써 얻어질 수 있다.

이 목적함수는 각 시간차에서 모든 수용가 전압이 그림 2에서 보여진 것처럼 상, 하한치로부터 규정전압에 가까운 전압을 유지하기까지 최대의 여유를 가짐을 보여준다. 그것은 상, 하한치 차이의 제공값의 최소를 등가적으로 의미하고 직하 수용가 전압은 LRT의 최적 보상

울에 의해 결정된다. 더욱이, 계산오차를 피하고 문제를 단순화 하기 위하여 직하, 말단 수용가측의 전압은 방정식 (2)와 직하, 말단 수용가 전압사이 비례 관계를 고려한 방정식 (3)같은 직하측에서 계산된 하나의 값으로 변환될 수 있다.

이 목적함수를 최소화함으로써, 모든 수용가의 요구되는 전압분포는 얻어질 수 있다. 방정식 (1)의 최소화 조건은 $dJ/dX_{mtr}=0$ 이고, LRT의 최적 보상율인 X_{mtr} 은 식 (4)와 같이 얻어질 수 있다.

$$X_{mtr}=R_{mtr} \cdot (V1_{max}(t)-V1_{min}(t))/2V1(t) \quad (4)$$

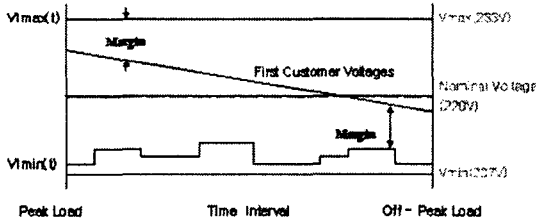


그림 2 LRT의 최적 전압보상을 결정

2.2 최적 정정치

부하중심전압과 등가임피던스로 표현되는 LDC 정정치는 한번 그것들이 고정되면 오랜 기간동안 같은 값으로 운용된다. 이들 값에 의해서 보상된 송출전압은 방정식 (4)의 최적 송출전압과 동일해야만 한다. 최적 송출전압은 방정식 (5)에서 보여진 것처럼 LDC 정정치와 일반적인 관계를 가지고 있다. 그러므로, 최적 정정치는 V_{ce} 와 Z_{eq} 에 대한 방정식을 풀어서 얻어질 수 있다.

$$V_{opt}(t)=V_{ce}+Z_{eq} \cdot I_{to}'(t) \quad (5)$$

여기서, $V_{opt}(t)$: X_{mtr} 에 의한 최적 송출전압

V_{ce} : 부하중심점의 전압

Z_{eq} : 등가임피던스

$I_{to}'(t)$: DSG를 통과하는 총 부하전류

($I_{to}'(t)=I_{to}(t)+I_{dsg}(t)$)이고 $I_{to}(t)$ 은 LRT의 총 부하전류이고 $I_{dsg}(t)$ 은 분산형전원 계통의 출력전류이다.

그러나, 분산형전원을 고려하면 총 부하전류가 변화하기 때문에 방정식 (5)의 최적 송출전압을 유지하는 것은 어렵다. 그 최적 송출전압은 넓은 분포특성을 그림 3에서 보여진 것처럼 선형방정식을 제공한다. 그러므로, 최적 LDC 정정치의 해는 1차 방정식의 계수를 알아내는 것과 등가이다. 최적 송출전압과 1차방정식 사이의 차이를 최소화 하는것이 타당하다. 여기서 최적 LDC값을 구하기 위하여 최소자승법을 이용한다. 그 차의 제곱합은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

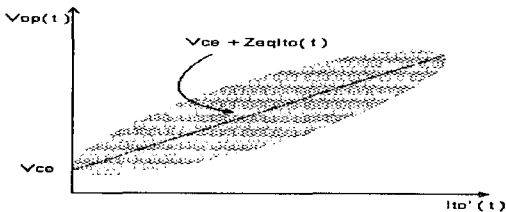


그림 3 송출전압의 분포특성

$$\text{Min } q = \sum_{t=1}^T \{V_{opt}(t) (V_{ce}+Z_{eq} \cdot I_{to}'(t))\}^2 \quad (6)$$

여기서, T : 전체 고찰기간

식 (6)을 최소화($\partial q/\partial Z_{eq} = \partial q/\partial V_{ce}=0$)하여, 전체 고찰기간의 최적 전압조정요소(Z_{eq} , V_{ce})를 구하면 다음식과 같다.

$$Z_{eq} = \left(\frac{\sum_{t=1}^T I_{to}'(t) \cdot \sum_{t=1}^T V_{op}(t) \cdot T \cdot \sum_{t=1}^T I_{to}'(t) \cdot V_{op}(t)}{\left(\sum_{t=1}^T I_{to}'(t) \right)^2 \cdot T \cdot \sum_{t=1}^T (I_{to}'(t))^2} \right) \quad (7)$$

$$V_{ce} = \left(\frac{\sum_{t=1}^T V_{op}(t) \cdot Z_{eq} \cdot \sum_{t=1}^T (I_{to}'(t))}{\sum_{t=1}^T T} \right) \quad (8)$$

3. 다수 전압조정기에 대한 최적 전압보상

방사상 배전계통에서, 선로전압조정장치(SVR)는 그림 4에서 보여진 것처럼 전압강하를 보상하기 위하여 긴 고압피더에 직렬적으로 상호 연결되어 있다. 이것은 또한 분산형전원 계통의 운용에 따른 전압변동의 몇몇 피더를 제어하는 것이 기대될 수 있다. 이러한 경우에, 수용가 전압은 배전용 변전소 LRT에 의해서 우선 조정되고 다음에 고압피더상의 SVR에 의해서 조절된다. 그러나 LTR의 전압보상은 LRT측 뿐만 아니라 SVR측의 수용가 전압에도 영향을 준다. 그러므로, LRT와 SVR 사이의 최적 조정은 그것들의 완전한 조절을 성취하기 위하여 고려될 필요가 있다.

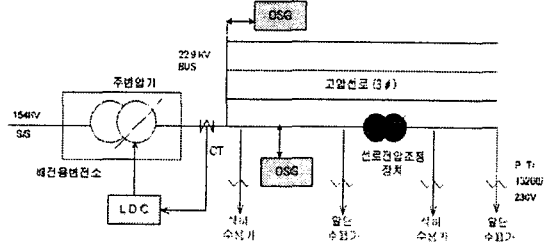


그림 4 분산형전원이 도입된 다수 전압조정기에 의한 전압조정

3.1 문제 공식화

이제, LRT와 SVR 조절에 의해서 수용가 전압 분포가 어떻게 가장 적당한 조건을 유지하도록 만드느냐 하는 것이 문제이다. SVR측의 수용가 전압 조건에 관계된 방정식을 더함으로써, 그리고 앞에서 설명된 것과 같은 과정을 사용함으로써 그 목적함수는 다음처럼 확장될 수 있다.

$$V_{drop}(t)=V1(t)-V3(t) \cdot V_{tap}/(V_n \cdot R_{vr}) \quad (9)$$

$$V3X(t)=V3(t) \cdot X_{vr}/R_{vr}+(X_{mtr}/R_{mtr}-1) \cdot V1(t) \cdot V_n \cdot X_{vr}/V_{tap} \quad (10)$$

$$\text{Min } J(t)=\{V1_{max}(t)-V1(t) \cdot X_{mtr}/R_{mtr}\}^2 + \{V1(t) \cdot X_{mtr}/R_{mtr}-V1_{min}(t)\}^2 + \{V3_{max}(t)-V3(t) \cdot X_{vr}/R_{vr}-V1(t) \cdot X_{vr} \cdot (X_{mtr}/R_{mtr}-1) \cdot P_{tap} \cdot V_n/V_{tap}\}^2 + \{V3(t) \cdot X_{vr}/R_{vr}+V1(t) \cdot (X_{mtr}/R_{mtr}-1) \cdot V_n \cdot X_{vr} \cdot P_{tap}/V_{tap}-V3_{min}(t)\}^2 + k (X_{mtr}-X_{vr})^2 \quad (11)$$

Subj.to,

$$V3_{max}(t)=V_{max} \quad (12)$$

$$V3_{min}(t)=V_{min} \cdot V3(t)/V4(t) \quad (13)$$

여기서, $V3(t), V4(t)$: SVR 직하, 말단의 수용가전압
 $V3_{max}(t), V3_{min}(t)$: SVR 직하로 환산된 허용전압의 상하한치

V3X(t) : 최적 전압보상율이 적용된 V3(t)
 Rvr : SVR의 전압보상율
 Xvr : SVR의 최적 전압보상율
 Ptap : 주상변압기 비율(=Ptap1/Ptap3)
 Vn : SVR의 정격전압
 Vtap : SVR의 tap 전압
 K : 무계상수

이 목적함수는 LRT와 SVR측의 직하 수용가 전압이상, 하한치로부터 최대여유를 가지고 그것들의 값이 규정전압에 밀접하도록 확보한다. 방정식 (11)에서 첫번째, 두번째 항목은 LRT측 수용가 전압이 오직 LRT를 조절함에 의해서 적당한 조건과 함께 유지되는 것을 보여준다. 세번째, 네번째 항목은 SVR측의 수용가 전압이 LRT와 SVR의 조정에 의한 적당한 분포와 함께 유지되는 것을 보여준다. 그 항목은 식 (9)의 LRT와 SVR측의 직하 수용가 전압 관계로부터 유도된다. 다섯번째 항목은 탭변화 횟수를 줄이기 위한 LRT와 SVR 사이의 조정 레벨이다.

3.2 Flowchart

방정식 (11)의 비선형 목적함수의 최소화 문제에 관해서, 분석법에 의해 국소적 최적해를 발견하는 것은 어렵다. 반복법은 일반적으로 사용되는데 적당한 초기값을 제공함에 의해 최적해에 수렴한다. 본 논문은 반복법에서 가장 유효한 기술로서 알려진, Broyden-Fletcher - Goldfarb-Shanno(BFGS) 공식을 사용한 quasi-Newton법에 집중한다. 최적해 산정 과정은 그림 5의 flow chart와 같다.

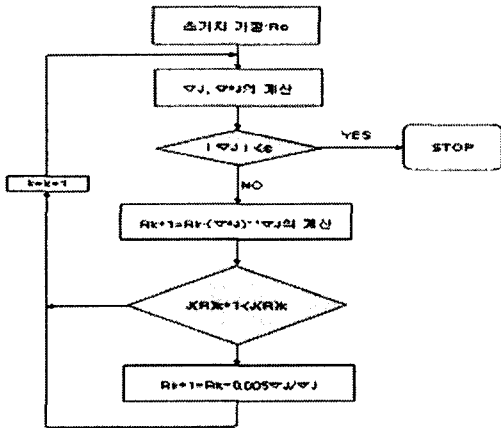


그림 5 최적 전압보상을 산정을 위한 flowchart

방정식 (9)의 함수에 대해 필요한 최적 조건은 다음 방정식을 만족해야만 한다.

$$\nabla J = [\partial J / \partial X_{mtr}, \partial J / \partial X_{vr}]^T = 0 \quad (14)$$

여기서, ∇J : X_{mtr} 과 X_{vr} 에 대한 J의 편미분한 구배 벡터

X_{mtr} 과 X_{vr} 의 최적값은 $\nabla J=0$ 을 풀면 알 수 있다. quasi-Newton법을 사용하므로, X_{mtr} 과 X_{vr} 의 해는 다음 반복 표현과 함께 얻어질 수 있다.

$$\begin{pmatrix} X_{mtr} \\ X_{vr} \end{pmatrix}^{(k+1)} = \begin{pmatrix} X_{mtr} \\ X_{vr} \end{pmatrix}^{(k)} + (B^{(k)})^{-1} \cdot (\nabla J) \quad (15)$$

여기서, k : 반복 스텝

$B^{(k)}$: Hessian 행렬 ($\nabla^2 J$)의 근사값

그 수법의 수렴특성은 초기값에 강하게 의존한다. 본 논문은 X_{mtr} 과 X_{vr} 사이의 관계를 고려한 시험과 오차의 규칙에 의하여 값을 제공한다. quasi-Newton법에 대한 풀이 알고리즘은 다음과 같다.

- [step1] $x^{(0)}$ 와 $B^{(0)}$ 의 적당한 초기치를 준다.
- [step2] 수렴최도에 의해 종료를 검토한다. 만약 수렴이 하지 않으면 탐색방향의 벡터 $d^{(k)}(=-[B^{(k)}]^{-1} \cdot \nabla J)$ 을 산정한다.
- [step3] 보호 2차의 보간법에 따른 선로 탐색법을 실행해서 적당한 스텝 크기($t^{(k)} > 0$)를 산정하고 $X^{(k+1)} (= X^{(k)} + t^{(k)} \cdot d^{(k)})$ 를 산정한다.
- [step4] BFGS 공식에 의해 역 Hessian 행렬 근사치를 갱신하고 [step2]로 돌아간다.

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 모델계통과 제조건

- ① 모델 배전계통은 그림 6과 같이 22.9kV 계통을 상정하며, 고압선로의 구간데이터는 표 1과 같다.
- ② 배전용변전소의 LRT의 일부하 패턴은 그림 7과 같이 45MW의 피크부하를 기준으로 100%~20%의 부하 변동 특성을 가진다. 피크부하는 1~8시간대, 미들 부하는 9~16시간대, 오프피크부하는 17~24시간대로 한다.
- ③ 저압측의 전압강하 배분은 주상변압기와 인입선, 저압선로의 최대 전압강하를 각각 4V, 4V, 8V로 상정한다.
- ④ 고압배전선로의 전압강하를 계산하기 위하여 quasi-Newton 반복법을 이용한 조류계산법을 이용하였다.
- ⑤ SVR의 설치지점은 그림 6의 10번 지점으로 상정하였다.

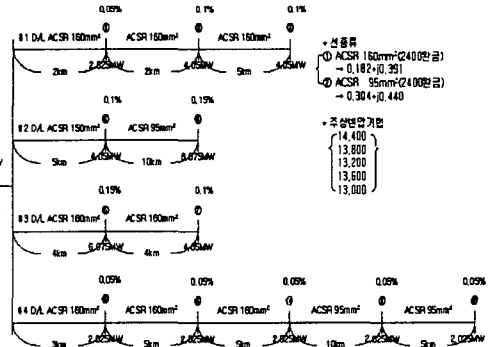


그림 6 22.9KV 모델계통

표 1 모델계통 구간데이터

Feeder Number	Section Number	Node Number	Node Number		Impedance		Length (km)	Pole Tr. Tap	Load(%)	
			From	To	R(Ω km)	X(Ω km)				
1	1	0	1	1	0.182	0.391	2.0	2290Q/230	5%	
			2	1	2	0.182	0.391	2.0	2290Q/230	10%
			3	2	3	0.182	0.391	2.0	2290Q/230	10%
2	4	0	4	4	0.182	0.391	5.0	2290Q/230	10%	
			5	4	5	0.304	0.440	10.0	2180Q/230	15%
3	6	0	6	6	0.182	0.391	4.0	2290Q/230	15%	
			7	6	7	0.182	0.391	4.0	2290Q/230	10%
4	8	0	8	8	0.182	0.391	3.0	2290Q/230	5%	
			9	8	9	0.182	0.391	5.0	2290Q/230	5%
			10	9	10	0.182	0.391	5.0	2180Q/230	5%
			11	10	11	0.304	0.440	10.0	2180Q/230	5%
			12	11	12	0.304	0.440	5.0	2180Q/230	5%

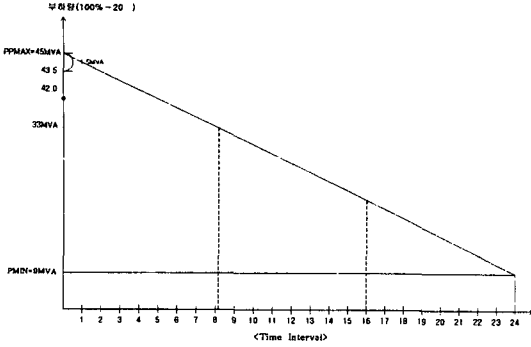


그림 7 모델계통의 일부하 곡선

4.2 시뮬레이션 결과

제안한 알고리즘에 의해 시뮬레이션 수행한 결과는 그림 8, 그림 9와 같다. 그림 8은 수용가의 전압이 허용 전압 내에 있음을 보여주며, 그림 9는 고정송출전압방식과 제안한 수법과의 평가지수를 비교한 것으로 제안한 알고리즘에 의한 평가지수가 우수하여 본 연구에서 제안한 방법의 유용성을 확인할 수 있었다.

표 2 최적전압조정의 LDC 값

	$Z_{eq}[\Omega]$ (등가임피던스)	$V_{ce}[V]$ (부하중심점 전압)
LTC+ LDC	1.266	21815.66

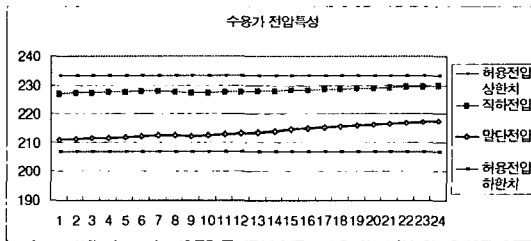


그림 8 제안한 방법에 의한 수용가 전압특성

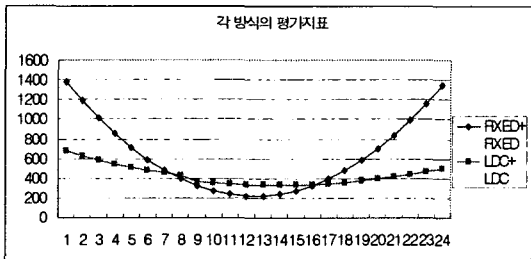


그림 9 각 방식에 의한 평가지표 비교

5. 결 론

본 논문에서는 분산형 전원이 도입된 배전계통의 전압 조정방안과 다수의 전압조정기가 설치된 배전계통의 최적 전압조정방안을 제안하였다. 그리고 효율적인 전압관리 위하여 기존의 LDC 수법의 통계적 해석에 기초한 최적 전압조정방안을 제시하고 또한 quasi-Newton 반복법에 의해서 다수 전압조정기의 최적운용을 제안하였다. 제안된 수법의 유용성을 증명하기 위하여 모델 배전

계통을 가지고 시뮬레이션을 수행하여 제안한 알고리즘의 유효성을 확인하였다

[참 고 문 헌]

- [1] Daeseok Rho, Horiyuki Kita, Kenichi Nishiya and Hasegawa Jun, "Voltage Regulation Methods Based on an Extended Approach and Neural Networks for Distribution System interconnected with DSG systems", 일본전기학회지B, 117권 3호, 1997년3월
- [2] "電壓管理の手引き", 북해도전력회사, 1993
- [3] Daeseok Rho, Hiroyuki Kita and Hasegawa Jun, "Basic Studies on the Impacts of Customer Voltages by the Operation of FRIENDS", 일본전기학회 전국대회 No.1486, 1997년3월
- [4] 이은미, 노대석, "고압배전선로의 선로전압조정장치(SVR)의 운용에 관한 연구(3)", 대한전기학회 전력기술분회 추계학술대회 논문집, 2003