

분산전원이 연계된 배전 계통의 SVR 최적 설치위치 선정

(A Study on the SVR Optimal Placement in Distribution System with Distributed Generators)

이현옥* · 허재선 · 김찬혁 · 김재철**

(Hyun-Ok Lee · Jae-Sun Huh · Chan-Hyeok Kim · Jae-Chul Kim)

Abstract

This paper proposes a new algorithm for the optimal placement of a step voltage regulator(SVR) in distribution system with Distributed Generators(DG) using a Particle Swarm Optimization(PSO). The objective function of this algorithm is to find optimal placement for minimum loss while maintaining each node voltage fluctuations within upper and lower limits. In the objective function of proposed algorithm, the deviations to reference voltage and the distribution loss are considered. To verify effectiveness of the proposed method, simulation is implemented using MATLAB.

Key Words : Voltage Quality, Step Voltage Regulator(SVR), Optimization Method, Distributed Generator(DG), Particle Swarm Optimization(PSO)

1. 서 론

태양광, 풍력 발전 등의 소규모 분산전원은 주로 수용가에 가까운 배전계통에 연계되고 있다. 그러나 태양광과 풍력은 기후나 온도, 지형적인 영향을 많이 받는 간헐적인 전원이고, 이들이 도입된 배전계통은 부하와 전원이 혼재되어 운용되는 형태이기 때문에 전

압품질에 악영향을 미치게 된다.

한편, 현행의 배전계통의 대부분의 전압조정은 배전용 변전소의 부하시 탭변환기(ULTC : Under Load Tap Changer)의 LDC(Line Drop Compensator) 운전 에 의하여 송출전압(22.9kV)을 조정하고, 고압배전선로의 주상변압기 탭 변환으로 조정되고 있다[1]. 또한 장거리 고압 배전선로나 전압강하가 10%이상인 구간 에 선로전압조정장치(SVR : Step Voltage Regulator) 를 도입하여 배전선로의 규정 전압을 유지하도록 이 루어지고 있다[2]. 하지만 기존에 설치된 SVR은 부하 밀집도, 분산전원의 도입 그리고 부하 패턴의 변화 등 을 고려하지 않아 운용상에 문제점이 발생되고 있다. 이와 관련해서 최근 SVR의 최적 설치 위치 선정을 위 한 연구가 활발히 진행되고 있다. 주상변압기 설치가 능 영역도를 활용한 방법[1], 유전자 알고리즘(GA)을 적용한 방법[3-4], 전력밀도를 이용한 방법[5] 등이

* 주저자 : 송실대학교 전기공학과 박사수료

** 교신저자 : 송실대학교 전기공학과 교수

* Main author : Doctor course, Department of Electrical Engineering, Soongsil University

** Corresponding author : Professor, Department of Electrical Engineering, Soongsil University

Tel : 02-820-0647, Fax : 02-817-0780

E-mail : jckim@ssu.ac.kr

접수일자 : 2013년 8월 22일

1차심사 : 2013년 8월 29일, 2차심사 : 2013년 9월 17일

심사완료 : 2013년 9월 26일

SVR의 설치위치를 선정하기 위해 제안되었다. 그러나 위 방법들은 설치위치에 따른 고압선로 손실을 고려하지 않아 SVR 설치 전보다 오히려 선로 손실이 증가 되는 경우가 발생할 수 있다.

본 논문에서는 분산전원이 연계된 배전계통에서 전압을 규정전압 범위 이내로 유지하면서 기준전압과의 편차와 고압선로의 손실을 최소화할 수 있는 SVR의 최적 설치위치를 선정하기 위해 기존 방식보다 알고리즘이 간단하고, 실제 구현이 용이한 PSO 알고리즘을 적용하는 방식을 제안하였다. 또한 모델계통을 이용하여 본 연구에서 제시한 SVR 최적설치위치 선정 알고리즘에 대해 시뮬레이션을 수행하여 본 연구의 유효성을 확인하였다.

2. SVR을 이용한 전압제어

SVR은 단권변압기와 부하시 탭 절환 장치로 구성되어 있다. 전압 변경은 단권변압기의 직렬권선의 탭 변경에 의해 이루어지며, 탭 위치는 보상회로에 의해 제어된다[6]. 현재 국내에 사용되고 있는 일반적인 SVR은 32개 탭으로 탭 간격이 0.625%이며, 기준전압의 $\pm 10\%$ 범위로 전압조정이 가능하다[7]. 그림 1은 SVR의 구조를 나타내었다. SVR을 이상적인 변압기로 가정하면, 전압비와 2차측 전압은 식 (1)과 (2)와 같이 표현할 수 있다[6].

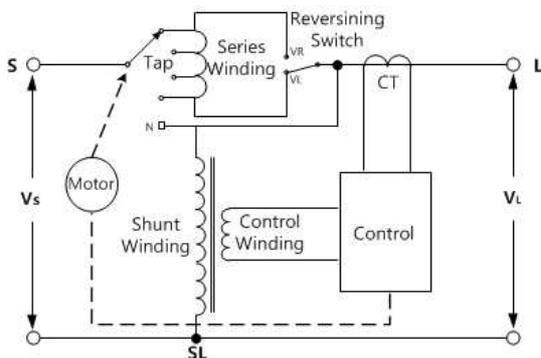


그림 1. SVR(Type-B)의 기본 구조
Fig. 1. Basic structure of the SVR(Type-B)

$$a_{vr}(t) = 1 \mp 0.00625 \times Tap(t) \quad (1)$$

$$V_L(t) = \frac{1}{a_{vr}(t)} \times V_S(t) \quad (2)$$

여기서 $a_{vr}(t)$ 는 SVR의 전압비, $Tap(t)$ 은 SVR의 탭 위치, $V_S(t)$ 는 SVR의 1차측 전압, $V_L(t)$ 는 SVR의 2차측 전압을 나타낸다. 식 (1)과 (2)의 모든 변수는 시간에 대한 함수이다. 식 (1)에서 승압인 경우는 -, 강압인 경우는 +로 표현된다.

3. 분산전원을 고려한 SVR 설치 위치 선정 알고리즘

SVR를 이용하여 고압선로의 전압을 승압 또는 강압하게 되면, 선로의 전류가 변화하여 선로손실과 전압강하 등에 영향을 준다[8]. 따라서 본 논문에서는 각 노드의 전압이 규정된 범위 이내로 유지하면서, 기준전압과의 편차와 전력 손실을 최소화할 수 있는 SVR의 설치위치를 선정하기 위한 알고리즘을 제안한다.

3.1 목적함수

식 (3)과 식 (4)는 SVR의 최적 설치위치를 설치하기 위한 목적함수를 나타내고 있다. 식 (3)의 첫 번째 항은 기준전압과의 편차를 의미하고, 두 번째 항은 고압선로의 손실을 나타낸다. 식 (4)는 기준전압과의 편차와 선로손실 최소치의 도출을 의미한다.

$$F(i) = \sum_{t=1}^T \left[\omega_1 \sum_{j=1}^N \{V_{jt}(i) - V_{ref}\}^2 + \omega_2 \sum_{k=1}^S PL_{kt}(i) \right] \quad (3)$$

$$\text{Min}_{i \in U_j} F(i) \quad (4)$$

여기서 i 는 SVR 설치 지점, U_j 는 SVR 설치 피더, T 는 전체 고찰 기간, N 은 SVR이 설치된 피더의 총 노드(node) 수, S 는 SVR이 설치된 피더의 고압 선로 구간(branch) 수, ω_1, ω_2 는 가중치, V_{ref} 는 기준 전압 (22.9 kV), $V_{jt}(i)$ 는 설치 지점 i 에서 SVR이 운용될 때의 t 시간에 j 노드의 전압, $PL_{kt}(i)$ 는 설치 지점 i 에서

SVR이 운용될 때의 t 시간에 k 구간의 고압선로 손실을 나타낸다.

3.2 제한조건

SVR의 최적 설치위치를 선정하기 위한 제한 조건은 다음과 같다.

(1) 전압 상·하한 제한

$$V_{\min} \leq V_j(t) \leq V_{\max} \quad (5)$$

(2) SVR 탭 위치 상·하한 제한

$$Tap_{\min} \leq Tap(t) \leq Tap_{\max} \quad (6)$$

여기서 $V_j(t)$ 는 t 시간에 j 노드의 전압, V_{\min} 와 V_{\max} 는 각 규정전압의 상·하한 값, $Tap(t)$ 은 SVR의 탭 위치, Tap_{\min} 과 Tap_{\max} 는 SVR의 탭 위치의 상·하한 값을 나타낸다.

3.3 PSO 기법을 적용한 최적 위치 선정 알고리즘

최근 SVR의 최적 위치 선정을 위해 GA(Genetic Algorithm)와 같은 진화연산 기법이 적용되어 좋은 성능을 보이고 있다[3-4]. 그러나 GA는 개체 수, 선택 방법이나 교배법의 결정, 돌연변이의 비율 등 결정해야 할 파라미터의 수가 많고, 설계자의 염색체 표현방법(encoding schemes) 숙달 정도에 따라 최적 해 도출에 영향을 준다. 따라서 본 논문에서는 알고리즘이 간단하고, 최적해 탐색능력에 영향을 미치는 파라미터가 적어 실제 구현이 용이하며, 계산시간이 짧은 특징을 가지고 있는 PSO(Particle Swarm Optimization)를 적용한 최적 위치 선정 방식을 제안하고자한다[9].

SVR 최적 설치위치 선정을 위해 SVR이 모든 구간에 설치 가능하다고 가정하고, 제어변수로는 SVR 설치지점을 위치벡터(Particle)로 구성하였다. 탭의 제한

범위는 -16~16탭으로 변압비로 나타내면 0.9~1.1pu라 할 수 있다. 일부하 곡선에 따라 각 노드의 전압을 규정전압 범위 이내로 유지하면서, 식 (3)과 식 (4)를 만족하는 최적 해를 찾기 위해 그림 2와 같이 PSO 알고리즘을 적용하였다.

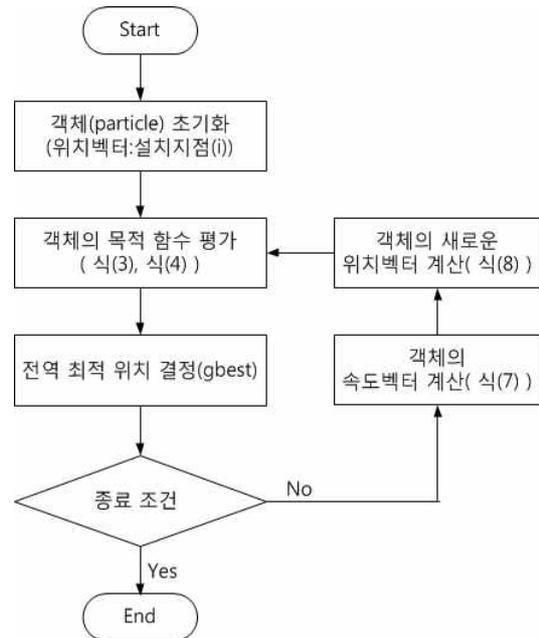


그림 2. SVR 최적 위치선정을 위한 PSO 알고리즘 순서도
Fig. 2. Flowchart of PSO Algorithm for SVR optimal placement

객체의 속도 벡터는 식 (7)에 의해 연산되며, 객체의 새로운 위치로 이동하는 중요한 인자가 된다. 객체의 새로운 위치는 식 (8)을 이용하여 결정된다.

$$V_i(t+1) = \omega V_i(t) + c_1 r_1 \times (pbest_i - X_i(t)) + c_2 r_2 \times (gbest - X_i(t)) \quad (7)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (8)$$

여기서 ω 는 관성하중(inertia weight), c_1 과 c_2 는 가속상수, r_1 과 r_2 는 0과 1사이의 랜덤상수, $pbest_i$ 는 객체 i 경험의 최상의 위치, $gbest$ 는 전체 객체의 경험

분산전원이 연계된 배전 계통의 SVR 최적 설치위치 선정

에서 최상의 위치, 그리고 $V_i(t)$ 와 $V_i(t+1)$ 은 t 와 $t+1$ 번째 스텝에서의 객체 i 의 속도이며, $X_i(t)$ 와 $X_i(t+1)$ 은 t 와 $t+1$ 번째 스텝에서의 객체 i 의 위치를 의미한다.

4. 사례연구를 통한 배전계통 전압분포 분석

4.1 모의 배전계통 및 사례연구 구성

분산전원이 도입된 모델 배전계통에 대하여, SVR의 유무 및 위치에 따른 배전계통 전압분포를 모의하였다. 그림 3과 표 1은 본 연구에서 모의한 배전계통의 구성도 및 파라미터 정보이다. 모의 배전계통에서 부하는 공업지역(2~4노드), 상업지역(5~10노드), 주택지역(11~16노드)으로 구분하며, 일부하 곡선은 그림 4와 같다[3]. 그리고 2번, 16번 노드에 각각 최대 1MW와 3MW의 태양광발전이 연계되어 있다. 태양광발전의 출력분포는 참고문헌 [4]를 참조하였다. 또한 10번 노드의 분산전원은 1MW의 일정한 발전량을 공급한다. 식 (3)의 가중치는 $\omega_1=1$, $\omega_2=10$ 으로 산정하고, 계통의 역할은 0.9, 분산전원의 역할은 1.0을 적용한다. 이와 같은 배전계통에 대해 SVR 설치위치 선정방식에 따른 전압분포를 모의하였다.

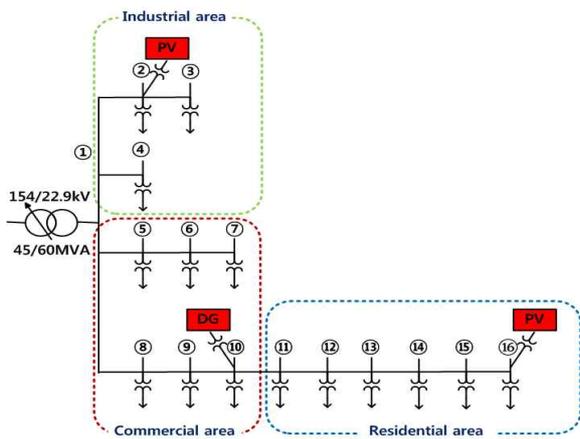


그림 3. 사례연구를 위한 배전계통 구성
Fig. 3. Concept of distribution system for simulation

- ① 방식 1 : 배전용변전소의 송출전압은 LDC 만으로 조정하고 SVR은 설치하지 않는 방식
- ② 방식 2 : 피크시의 전압강하 5% 발생지점에 SVR를 설치하는 방식[1].
- ③ 방식 3 : 전압제한과 전력손실을 고려해서 제한한 알고리즘을 통해 SVR 설치위치를 산출하는 방식

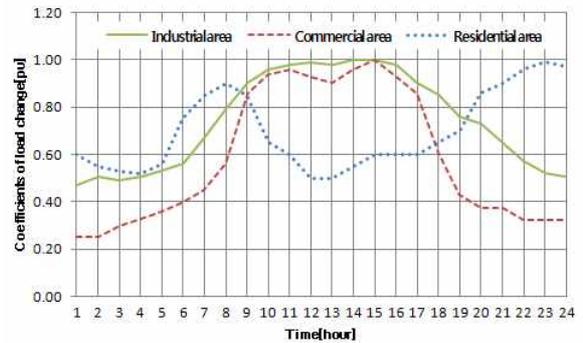


그림 4. 지역별 일부하 곡선
Fig. 4. Load curve according to area type

표 1. 모델계통의 파라미터
Table 1. Parameter for distribution system model

From bus	To bus	R Ω	X Ω	Load		DG Capacity MW
				P MW	Q Mvar	
1	2	0.728	1.564	3	1.35	1
2	3	0.728	1.564	3	1.35	
1	4	0.091	0.196	8	3.60	
1	5	0.364	0.782	2	0.90	
5	6	0.364	0.782	3	1.35	
6	7	0.910	1.955	3	1.35	
1	8	0.546	1.173	0.5	0.23	
8	9	0.364	0.782	1	0.45	
9	10	0.364	0.782	1	0.45	1
10	11	0.364	0.782	0.5	0.23	
11	12	0.546	1.173	0.5	0.23	
12	13	0.728	1.564	0.5	0.23	
13	14	0.728	1.564	1	0.45	
14	15	0.910	1.955	1	0.45	
15	16	0.910	1.955	2	0.90	3

4.2 시뮬레이션 결과

분산전원 연계 전과 연계 후의 배전계통에서 SVR의 기존 위치선정방식과 본 연구에서 제안한 방식에 대해 평가지표와 전력손실량을 비교한다. 3장에서 제안한 알고리즘을 통해 산출된 SVR의 최적위치는 그림 5에서 나타난 것과 같이 14번 노드로 도출되었다. 이 결과를 통해 시뮬레이션을 진행한다.

먼저 분산전원이 연계되지 않은 모델계통에 대하여, 그림 6에서 각 설치위치 선정방식에 따른 전압분포를 나타내고 있으며, 그림 7은 2, 10, 16노드에 분산전원이 연계된 모의계통에 대한 결과이다.

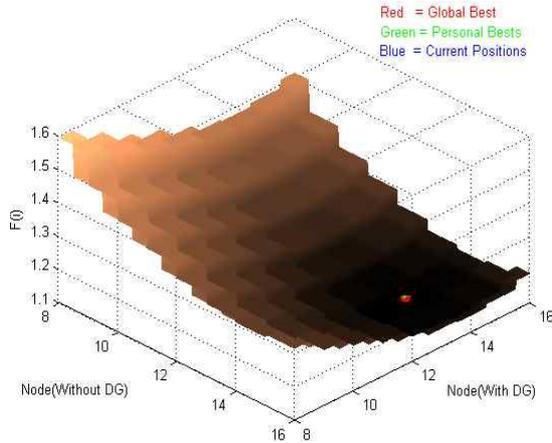


그림 5. 최적위치 선정에 대한 알고리즘 계산 결과
Fig. 5. Calculation results of Algorithm for optimal placement

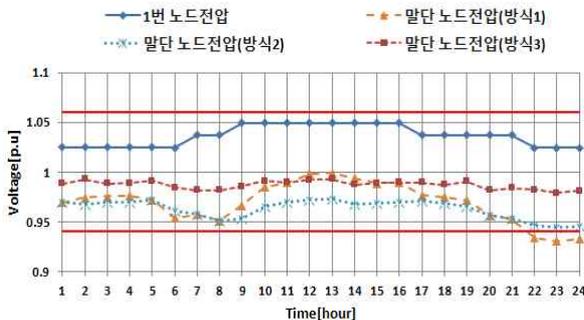


그림 6. 분산전원 연계 전 각 방식의 노드 전압특성
Fig. 6. Node voltage of distribution system without DG

각 설치위치 선정방식에 대해 전압분포 개선효과를 정량적으로 확인하기 위해 전압분포의 정도에 대한 평가지표와 고압선로의 손실을 산출하여 비교하였다.

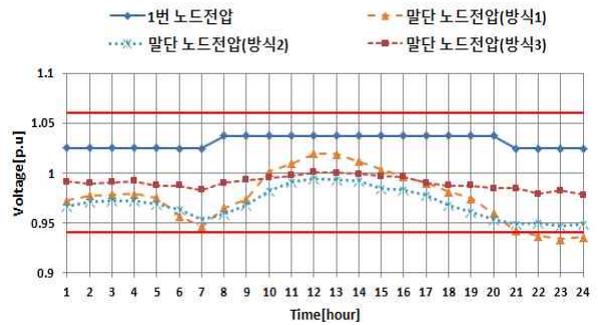


그림 7. 분산전원 연계 후 각 방식의 노드 전압특성
Fig. 7. Node voltage of distribution system with DG

먼저 식 (9)는 평가지표(PI : Performance Index)에 대한 수식을 나타내고 있다. 배전계통에 있어서 SVR이 설치된 피더의 각 노드 전압분포특성의 수준을 평가하는 것으로, 평가지표가 작으면 작을수록 전압특성이 양호하다는 것을 나타낸다. 따라서 SVR 설치지점에 따른 전압분포특성을 비교함으로써, 그 수법자체의 우수성을 평가할 수 있다.

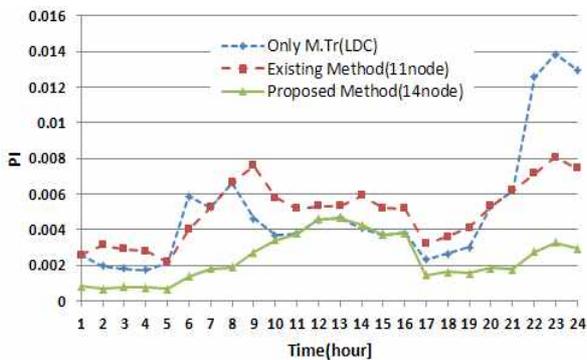
$$PI = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N \{V_{jt}(i) - V_{ref}\}^2 \quad (9)$$

그림 8과 표 2는 설치위치 선정방식에 따른 전압분포와 평가지표에 대한 결과를 보여주고 있다. PSO 알고리즘을 활용하여 선정된 위치(방식 3)에 SVR을 설치하여 운용하는 경우가 분산전원 연계 후에도 전체적으로 기준전압에 가깝게 유지됨을 알 수 있다. 그러나 SVR을 설치했다 하더라도 설치 위치가 적절하지 않으면, 각 노드의 전압은 규정전압 범위 이내를 유지하지만 표 2에서 총 편차 값이 SVR을 운용하지 않은 경우의 총 편차 값보다 큰 것을 확인할 수 있다.

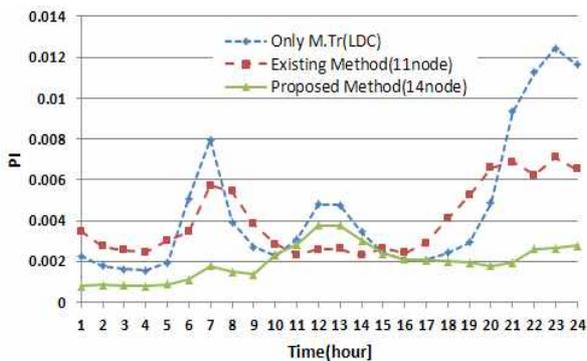
또한 배전용변전소 ULTC와 SVR의 탭 동작에 의한 전압조정은 선로의 조류에 영향을 주기 때문에 고압선로 손실을 고려해야 한다. 그러므로 SVR 설치위

분산전원이 연계된 배전 계통의 SVR 최적 설치위치 선정

치에 따른 식 (3)의 두 번째 항의 값(고압선로 손실)을 비교하여 그 수법의 우수성을 평가한다. 각 방식의 고압선로 손실은 표 3에서 보여준다. 제안한 방식(방식 3)이 SVR 설치 전(방식 1)보다 전력손실이 감소되어 유효성을 확인 할 수 있으며, 기존설치 방식(방식 2)은 SVR 설치 전과 비슷하거나 오히려 증가되는 경우가 발생하여 SVR의 설치와 더불어, 설치위치 선택이 매우 중요함을 알 수 있다.



(a) 분산전원 연계 전



(b) 분산전원 연계 후

그림 8. 시뮬레이션 결과에 대한 평가지표 분석
Fig. 8. PI analysis for simulation results

표 2. 설치위치에 따른 평가지표 비교
Table 2. Average of Performance Index according to Installation position

DG연계 여부	방식1	방식2	방식3
연계 전	0.004997	0.005011	0.002376
연계 후	0.004529	0.003996	0.001993

표 3. 설치위치에 따른 선로 손실 비교
Table 3. Total Power Loss according to Installation position

DG연계 여부	방식1	방식2	방식3
연계 전	3742.6kW	3762.4kW	3612.6kW
연계 후	2549.6kW	2547.8kW	2439.8kW

5. 결 론

본 논문에서 최근 분산전원의 연계된 배전계통 내 SVR의 위치 선정에 관한 연구를 하였다. 일부하곡선이 적용된 배전계통에서 각 노드의 전압을 규정전압 범위 이내로 유지하면서, 선로의 손실을 최소화할 수 있는 SVR의 설치위치 선정방법으로 PSO 알고리즘 적용 방식을 제시하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 배전계통에서 SVR의 최적 위치 선정을 위해 제안된 방식이 기존의 방식에 비해 평가지표가 우수하여 기준전압에 더 가깝게 유지됨을 확인하였다.
- (2) SVR의 설치위치에 따라 선로손실이 SVR 설치 전보다 증가하는 경우가 있을 수 있으나, 제안한 알고리즘을 통해 선정한 위치에 SVR을 설치할 경우 선로 손실이 감소됨을 확인하였다.
- (3) 분산전원이 연계된 배전계통에 대한 SVR 최적 위치를 선정함에 대해서도 제안한 알고리즘에 의해 선정된 SVR 설치위치가 평가지표와 선로 손실을 개선함을 보였다.

References

- [1] E. M. Lee, M. Y. Kim, D. S. Rho, S. W. Sohn, J. E. Kim, and C. H. Park, "A Study on the Optimal Introduction of Step voltage Regulator(SVR) in Distribution Feeders", Trans. KIEE, Vol. 53A, No. 11, pp. 610-618, Nov, 2004.
- [2] Joonho Son, Sangwon Heo, Daeseok Rho and Eui-Hwan Kim, "Optimal Operation System of Step Voltage Regulator in Primary Feeders with Distributed Generations", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 12, No. 6 pp. 2698-2706, 2011.
- [3] Takanari Kobayashi, Hidenori Aoki, "SVR Optimal Placement Problem in Distribution Network with Distributed Generators", IEEE Power and Energy Society

- General Meeting, 2012.
- [4] Terukuni Shiino and Hidenori Aokil, "Optimal Placement of SVRs Considering Multiple Loads", Electrical Engineering in Japan, Vol. 182, No. 1, 2013, pp. 39-47.
 - [5] Yoshiyuki Kubota and Takamu Genji, "Finding Optimal SVR Placement in Distribution Systems Using Power Density Model", Electrical Engineering in Japan, Vol. 158, No. 4, 2007, pp. 11-21.
 - [6] W. H. Kersting, "Distribution Feeder Voltage Regulation Control", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.46, NO.2, pp. 620-626, March/April 2010.
 - [7] Woo-Kyu Chae, Hak-Ju Lee, Won-Wook Jung, Ju-Yong Kim, "A Study on the Application of SVR at the Distribution Line Interconnected with Wind Turbine", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2010) 24(8) : 109~118.
 - [8] Anastasia S. Safigianni and George J. Salis, "Optimum Voltage Regulator Placement in a Radial Power Distribution Network", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, NO. 2, pp. 879-886, May 2000.
 - [9] J. Kennedy, "The Particle Swarm: Social adaptation of knowledge", Proc. IEEE Int. Conf. Evolutionary Comput., pp. 303-308, 1997.



허재선(許宰善)

1985년 1월 23일생. 2003년 숭실대 전기공학부 졸업. 2011년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



김찬혁(金燦焮)

1979년 6월 1일생. 2008년 한국기술 교육대학교 전기공학과 졸업. 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년~현재 동 대학원 전기공학과 박사 과정. 2009년~현재 한국전기산업연구원 연구원.



김재철(金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대 전기공학과 졸업, 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988년~현재 숭실대 전기공학과 교수.

◇ 저자소개 ◇



이현옥(李鉉玉)

1972년 5월 4일생. 1999년 한국기술 교육대학교 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사수료. 2004년~현재 한국전기공사협회.