

목표 및 비 목표 모선의 분산전원 최대 Hosting capacity 간의 상관관계 분석

Correlation Analysis between Distributed Generation Maximum Hosting Capacity of Target and Non-Target Bus

김 지 수* · 오 윤 식* · 조 규 정* · 김 민 성* · 김 철 환†
(Ji-Soo Kim · Yun-Sik Oh · Gyu-Jung Cho · Min-Sung Kim · Chul-Hwan Kim)

Abstract - These days, a penetration of distributed generation(DG) has increased in power system. Due to increased penetration of DG, a whole system is forced to install the maximum hosting capacity of DG. Therefore analysis between the maximum hosting capacity of DG at the target bus and the whole system is important. If we know the maximum hosting capacity, it will be able to satisfy the demand of system planner and customer. In this paper, we use a genetic algorithm to calculate the hosting capacity with optimization program using Design Analysis Kit for Optimization and Terascale Applications(DAKOTA). To consider a real system, we establish constraints and use IEEE 34 node test system. In addition, through the correlation coefficient between the target bus and the other buses, when capacity of DG at the target bus increases, we analyze which capacity of DG at the other buses will be decreased.

Key Words : Correlation coefficient, Distributed generation, Genetic algorithm, Maximum hosting capacity, Optimization

1. 서 론

분산전원이란 기존에 사용되고 있는 에너지 자원과 다르게 계통내에서 분산되어 있는 형태로 에너지를 공급하는 전원을 칭한다. 분산전원의 종류로는 태양광, 풍력 등이 있으며 이러한 에너지 자원들은 기존 사용되고 있는 화력에너지의 자원인 석유와 석탄이 고갈됨에 따라 필요 불가결한 존재가 되고 있다[1]. 그에 따라 미국, 일본 등 여러 나라에서 분산전원의 도입을 증가시키 고자 노력하고 있으며, 우리나라 또한 이러한 세계적인 추세에 따라 많은 연구를 진행하고 있다[2]. 미래에는 현재 사용되고 있는 화력에너지의 문제점으로 인하여 분산전원의 점유율은 증가 할 것이며 최종적으로는 대다수의 전력을 분산전원이 책임질 것으로 예측된다. 그렇기 때문에 종래의 배전계통 내에서 분산전원의 용량이 얼마나 증가할 수 있는지 또한 중요한 문제이며 이 때 계통 내에 존재할 수 있는 최대 분산전원 용량을 maximum hosting capacity라고 한다. 미국 전력연구소(Electric Power Research Institute, EPRI)는 분산전원의 침투율이 증가하는 과정에서 maximum hosting capacity의 연구가 필수적이라고 주장하며[3] 미국 신재생에너지 연구소(National Renewable Energy Laboratory, NREL) 또한 용량, 위치와 같은 분산전원의 특성과 capacitor의 개수와 같은 여러 변수들을 고려하여 계통 토폴로

지를 최적화하는 방안에 대하여 연구 중에 있다[4]. 하지만 계통 전체가 아닌 각각의 수용가 측면에서 고려되는 maximum hosting capacity는 연구가 부족한 실정이다. 계통 설계자와 수용가의 요구로 인하여 각각의 수용가 또는 특정 구역에서의 분산전원의 용량은 증가할 것이며 이런 상황에서도 기존 계통의 maximum hosting capacity를 유지해야만 할 것이다.

본 논문에서는 계통 내에 존재할 수 있는 분산전원의 maximum hosting capacity를 제시하고자 하며 또한 부하마다 설치될 수 있는 분산전원의 최대용량을 제시하고자 한다. 본 논문의 목적은 계통 전체와 각각의 부하에 대한 분산전원의 maximum hosting capacity를 계산하는 것이다. 기존의 계통 내 maximum hosting capacity가 고정된 상태에서 목표 모선에 많은 분산전원들이 설치 가 된다면 목표 모선이 아닌 곳에 설치된 분산전원들은 그 용량이 저감된다. 그에 따른 모선마다의 상관관계를 파악하고 실제 분산전원의 용량 증감량을 비교하여 검증하는 것이 본 논문의 목적이 다. 본 논문에서 사용된 계통은 전력조류 계산프로그램 Open source Distribution System Simulator (OpenDSS)[5]에서 제공하는 IEEE 34 node test system을 사용하였으며, 유전알고리즘은 최적화 프로그램인 Design Analysis Kit for Optimization and Terascale Applications(DAKOTA)[6]를 사용하였다.

2. 모델링 및 제약조건

2.1 태양광 발전(Photovoltaic, PV)

본 논문에서 사용된 분산전원은 PV이다. 위치가 제한되는 대

† Corresponding Author : College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University
E-mail: hmwkim@hanmail.net

* College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University

Received : March 6, 2017; Accepted : August 3, 2017

규모의 풍력단지에 비하여 소규모의 마이크로그리드 내에서는 rooftop 구조의 소규모 PV에 대한 연구가 진행되고 있으며 지형적인 특성으로 인하여 많은 국가에서 PV를 주로 사용하고 있다 [7]. PV는 모든 부하에 설치를 하였으며 2015년 6월 Southern California의 일사량 데이터를 통하여 모델링을 진행하였다. 일사량 데이터는 NREL's National Solar Radiation Database의 open source에서 취득하였다[8].

2.2 부 하

부하는 총 4가지의 종류로 구분할 수 있으며, 각각 domestic single/multiple (DOM), small commercial (COM), industrial (IND), 마지막으로 street and area lightning(SL)이다. 이들은 각각 부하량과 상의 개수로 구분할 수 있다[9]. 알고리즘은 그림 1과 같으며 그림 1과 같은 과정을 통하여 구분된 부하의 종류에 따라 일일 부하량을 설정하였다[9].

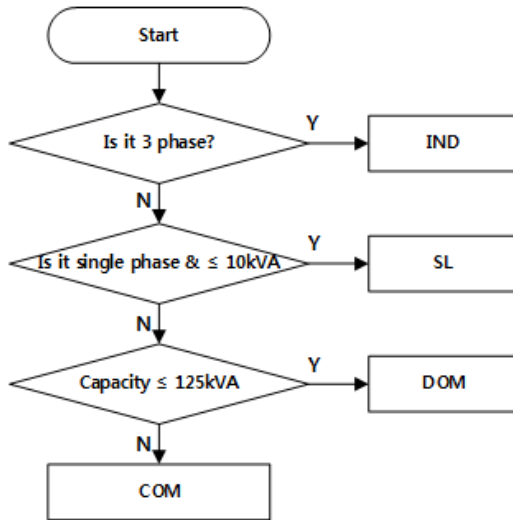


그림 1 부하 할당 알고리즘[9]

Fig. 1 Algorithm of load allocation[9]

2.3 제약조건

시뮬레이션의 제약조건으로는 PV의 용량이 증가함에 있어 계통 내에서 발생할 수 있는 문제점들을 선정하였다. 전압과 역조류, 변압기 용량, 허용전류를 제약조건으로 선정하였으며 각각에 대한 설명은 다음과 같다[10].

2.3.1 전압

식 (1)은 전압제한을 의미한다. PV의 용량이 증가함에 따라 PV 출력의 간헐성이 증가하게 되고 이는 계통 내의 극심한 전압 변동을 발생시켜 계통 불안정을 야기한다. 그렇기 때문에 심각한 전압상승과 강하를 방지하기 위하여 식 (1)과 같은 제한을 설정하였다.

$$0.9 \leq V_{i p.u} \leq 1.1 \quad (1)$$

여기서, V_i : i번째 노드의 전압

2.3.2 역조류

PV가 설치되어 있는 부하의 용량보다 초과하는 용량을 갖는다면 기존의 조류흐름과는 반대 방향을 갖는 역조류가 흐를 수 있다. 이는 정상상태일 때 선로에는 큰 악영향이 없으나 기존의 단방향 계통에 적합하게 설계된 변압기에게는 치명적인 고장을 야기할 수 있다. 그렇기 때문에 계통 내 변압기에서만 역조류가 흐르지 않도록 제한하였다. 따라서 기존의 조류 방향을 (+)라고 할 때 식 (2)를 만족해야만 한다.

$$P_i > 0 \quad (2)$$

여기서, P_i : i번째 변압기에 흐르는 down stream 방향의 유효전력

2.3.3 변압기용량

2.3.2절의 역조류와 같은 이유로 종래의 변압기의 용량을 초과하는 조류가 흐르게 되면 기존 계통에 맞게 설계된 변압기는 심각한 손상을 갖는다. 따라서 식 (3)과 같이 변압기용량을 초과할 수 없는 제약조건을 설정하였다.

$$\sqrt{P_i^2 + Q_i^2} \leq S_{Transformer.i} \quad (3)$$

여기서, P_i : i번째 변압기에 흐르는 유효전력

Q_i : i번째 변압기에 흐르는 무효전력

$S_{Transformer.i}$: i번째 변압기 최대 피상전력

2.3.4 허용전류

각각의 도체에는 흐를 수 있는 전류가 제한이 되어있다. 이를 허용전류(Ampacity)라고 하며 이 제한을 초과할 경우에는 전선 및 케이블에 온도가 상승하여 계통에 손실 및 악영향을 끼치게 된다[11]. 따라서 식 (4)와 같은 제약조건을 설정하였다.

$$I_i \leq Ampacity_i \quad (4)$$

여기서, I_i : i번째 도체에 흐르는 전류

$Ampacity_i$: i번째 도체의 허용전류

3. Hosting capacity 산출 알고리즘

3.1 Multi-objective를 이용한 유전알고리즘

계통 전체와 하나의 모선의 maximum hosting capacity를 동

시에 구하기 위해서는 multi-objective 함수를 계산하는 유전알고리즘을 응용해야 한다. DAKOTA에서는 multi-objective genetic algorithm(moga)를 제공하고 있으며[5], 본 논문에서는 다중목적 함수로 식 (5)를 사용하였다. 전체 계통의 maximum hosting capacity 안에서 목표 모선과 비 목표 모선간의 상관계수를 분석하기 위하여 다음과 같은 목적함수를 설정할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 f_1 &= \text{Hosting capacity of whole system} \\
 f_2 &= \text{Hosting capacity of target bus} \\
 \text{objective function} &= \max(f_1, f_2)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

계통 전체의 maximum hosting capacity와 목표 모선의 maximum hosting capacity를 구하기 위하여 2개의 목적함수가 필요하며 그림 2와 같은 알고리즘을 통하여 최종값을 산출한다. 따라서 f_1 과 f_2 가 최대가 되는 경우를 찾게 되며 그에 따라 전체 계통의 maximum hosting capacity는 유지된다. 초기 PV 용량이 DAKOTA에서 설정되면 OpenDSS를 통하여 주어진 값에 대한 조류흐름을 계산한다. 이 값들에 대한 제약조건을 MATLAB을 통하여 검사하게 되며 알고리즘 내에서 선택한 마지막 세대가 될 때까지 반복 작업을 수행하게 된다. 제약조건을 벗어나게 된다면

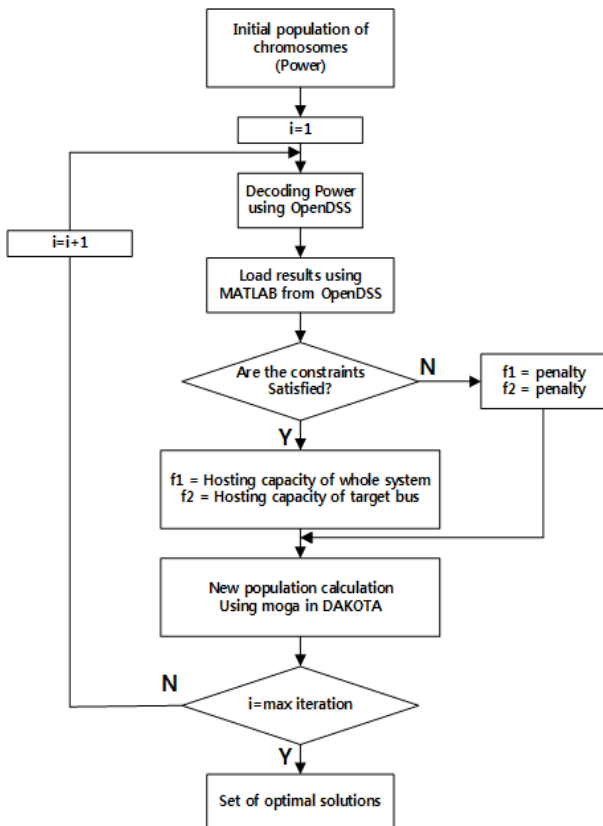


그림 2 제안된 다중 목적 유전알고리즘 순서도
 Fig. 2 Proposed flow chart of multi-objective genetic algorithm

벌점을 받으며 이에 따라 최적화 프로그램 DAKOTA는 최종 결과에서 벌점을 받은 경우를 제외하게 된다.

3.2 상관도 분석

3.1절 과정을 통하여 목표 모선의 maximum hosting capacity를 구할 수 있다. 하지만 전체 계통의 maximum hosting capacity 또한 최대화를 하도록 알고리즘이 수행되기 때문에 전체 계통의 maximum hosting capacity는 변하지 않는다. 따라서 하나의 모선에서 PV가 많이 설치될수록 다른 모선에서는 PV의 용량이 감소할 수밖에 없다. 이를 상관관계로 분석을 하면 어떠한 모선끼리 trade-off 관계를 갖고 있는지 알 수 있다. 식 (6)은 변량 v_1, v_2 에 대한 피어슨 상관계수이다[12].

$$r_{v_1 v_2} = \frac{\sum_{i=1}^n (v_{1i} - \bar{v}_1)(v_{2i} - \bar{v}_2)}{(n-1)\sigma_{v_1}\sigma_{v_2}}
 \tag{6}$$

여기서, \bar{v}_1, \bar{v}_2 = 두 변량의 평균
 $\sigma_{v_1}, \sigma_{v_2}$ = 두 변량의 표준편차
 v_{1i}, v_{2i} = i번째 두 변량의 값
 n = 변량의 개수

또한 표 1은 상관계수 크기에 따른 두 변량간의 선형관계를 보여준다. 상관계수는 -1부터 +1 사이에 존재하게 되며 +1에 가까울수록 비례 관계인 양적 관계를, -1에 가까울수록 반비례 관계인 음적 관계를 갖게 된다.

표 1 상관계수에 따른 관계

Table 1 Relationship according to correlation coefficient

Range	Linear Relationship
$-1.0 \leq r_{v_1 v_2} < -0.7$	Strong negative
$-0.7 \leq r_{v_1 v_2} < -0.3$	Clear negative
$-0.3 \leq r_{v_1 v_2} < -0.1$	Weak negative
$-0.1 \leq r_{v_1 v_2} < +0.1$	Neglect
$+0.1 \leq r_{v_1 v_2} < +0.3$	Weak positive
$+0.3 \leq r_{v_1 v_2} < +0.7$	Clear positive
$+0.7 \leq r_{v_1 v_2} \leq +1.0$	Strong positive

4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 계통 및 조건

그림 3은 본 논문에서 사용한 IEEE 34 node test system의 계통도이다. 2개의 Step Voltage Regulator (SVR)와 1개의 변압기, 2개의 capacitor bank가 포함되어 있다. 2015년 중 가장 부

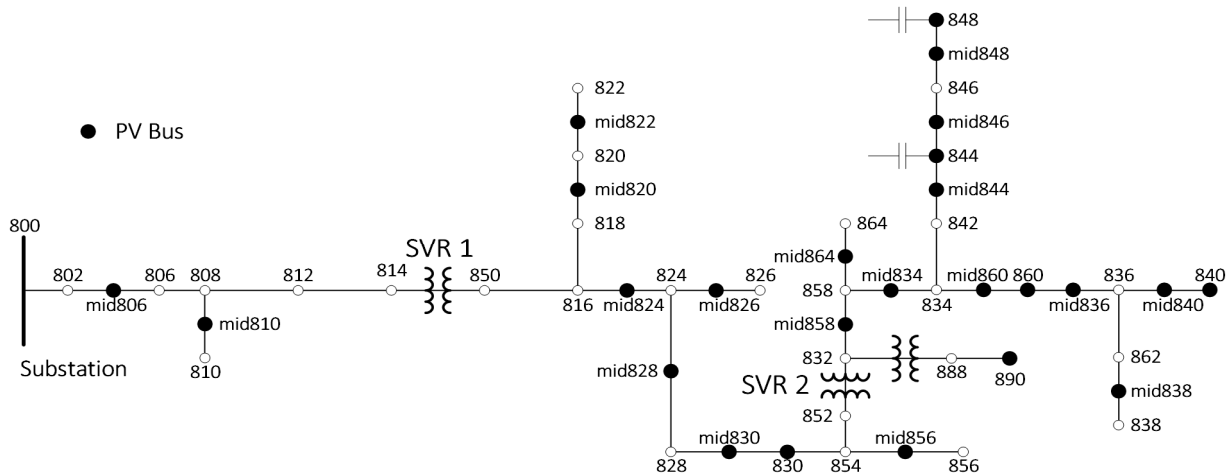


그림 3 IEEE 34 node test system의 계통도
 Fig. 3 Distribution diagram of IEEE 34 node test system

하량이 높았던 6월 30일의 일일 데이터를 사용하였으며, time step은 15[min]으로 시뮬레이션을 수행하였다. 목표 모선은 '890', '860', '848', 'mid838' 4개로 선정하였다.

IEEE 34 node test system의 부하들은 그림 1과 같은 과정으로 표 2와 같이 구분할 수 있으며 구분된 4가지의 부하종류에 따라 부하 데이터를 나누었다. 그림 4는 시뮬레이션에서 사용한 일일 부하량이 가장 높았을 때의 부하 곡선이며 그림 5는 그 날의 일사량 곡선이다.

표 2 부하 조건
 Table 2 Load condition

Bus	Phase	Capacity [kVA]	Type	Bus	Phase	Capacity [kVA]	Type
860	3	76.8	IND	mid830	1	7.6	SL
840	3	34.2	IND	mid856	1	4.5	SL
844	3	513.1	IND	mid858	1	16.6	DOM
848	3	76.8	IND	mid864	1	2.2	SL
830	1	49.3	DOM	mid834	1	36.2	DOM
890	3	503.1	IND	mid860	1	163.2	COM
mid806	1	62.2	DOM	mid836	1	92.6	DOM
mid810	1	17.9	DOM	mid840	1	44.7	DOM
mid820	1	38.0	DOM	mid838	1	31.3	DOM
mid822	1	152.1	COM	mid844	1	10.3	DOM
mid824	1	5.4	SL	mid846	1	50.6	DOM
mid826	1	44.7	DOM	mid848	1	25.5	DOM
mid828	1	4.5	SL				

4.2 시뮬레이션 결과 및 분석

표 3은 전체계통의 hosting capacity 만을 목적함수로 선정하였을 때의 결과이다. 총 hosting capacity는 2.985[MVA]가 산출되었으며 이는 계통 전체의 Peak 부하가 1.73[MVA]이므로

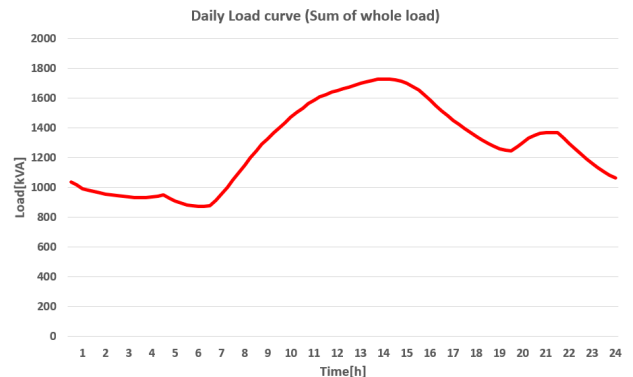


그림 4 일일 부하 곡선 (전체 부하의 합)
 Fig. 4 Daily load curve (sum of whole load)

표 3 전체 계통의 hosting capacity
 Table 3 Hosting capacity of whole system

Bus	Capacity [kVA]	Bus	Capacity [kVA]
860	155	mid830	5
840	120	mid856	95
844	145	mid858	35
848	275	mid864	150
830	95	mid834	55
890	165	mid860	5
mid806	185	mid836	50
mid810	165	mid840	105
mid820	225	mid838	175
mid822	225	mid844	0
mid824	225	mid846	0
mid826	270	mid848	35
mid828	25	Total	2,985

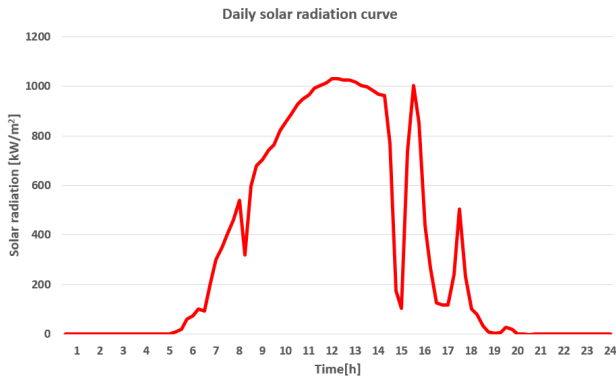


그림 5 일일 일사량 곡선
Fig. 5 Daily solar radiation curve

표 4 목표 모선과 전체 계통의 hosting capacity
Table 4 Hosting capacity of the target bus and the whole system

	890	860	848	mid838
Existing Hosting capacity [kVA]	165	155	275	175
Maximum allowable Hosting capacity [kVA]	310	350	310	315
Variation [kVA]	+145	+195	+25	+140
Whole system Maximum hosting capacity [kVA]	2,980	3,005	2,985	2,995
Variation [kVA]	-5	+20	0	+10

표 5 'mid838' 목표 모선과 다른 모선간의 상관계수
Table 5 Correlation coefficient between the 'mid838' target bus and the others

Bus	Correlation coefficient	Bus	Correlation coefficient
860	0.12	mid830	0.19
840	0.05	mid856	-0.04
844	-0.39	mid858	0.02
848	-0.12	mid864	0.33
830	-0.32	mid834	-0.10
890	0.09	mid860	-0.24
mid806	0.16	mid836	0.15
mid810	0.30	mid840	-0.15
mid820	0.28	mid838	1
mid822	0.19	mid844	-0.27
mid824	0.10	mid846	-0.26
mid826	0.18	mid848	-0.04
mid828	-0.20		

표 6 '848' 목표 모선과 다른 모선간의 상관계수
Table 6 Correlation coefficient between the '848' target bus and the others

Bus	Correlation coefficient	Bus	Correlation coefficient
860	-0.03	mid830	-0.04
840	-0.02	mid856	-0.23
844	0.08	mid858	0
848	1	mid864	-0.18
830	0.15	mid834	0.07
890	0.05	mid860	0.03
mid806	-0.20	mid836	-0.06
mid810	-0.02	mid840	-0.05
mid820	-0.06	mid838	-0.12
mid822	-0.20	mid844	-0.12
mid824	0.10	mid846	-0.15
mid826	-0.10	mid848	-0.10
mid828	-0.14		

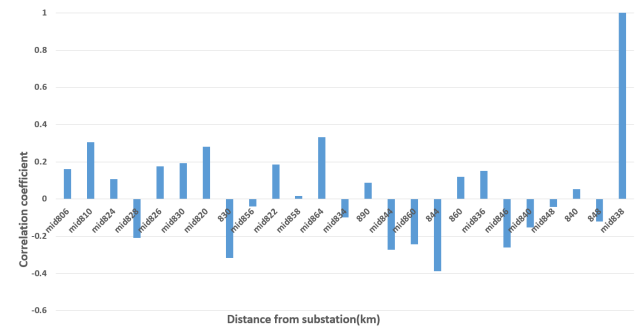


그림 6 변전소부터의 거리에 따른 상관계수 - 표 5
Fig. 6 Correlation coefficient according to distance from substation - Table 5

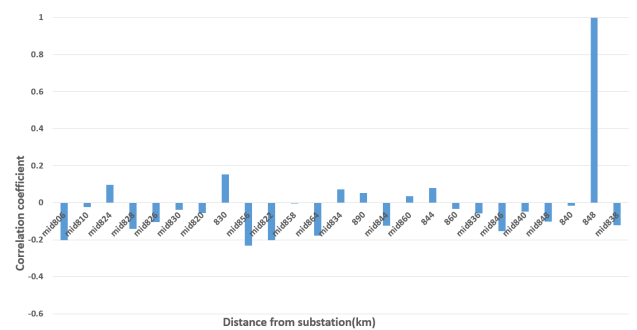


그림 7 변전소부터의 거리에 따른 상관계수 - 표 6
Fig. 7 Correlation coefficient according to distance from substation - Table 6

172.5[%]의 침투율을 갖는다. 각 모선에서 해당하는 부하량을 초과하는 PV의 용량을 갖는 경우 전압 및 허용전류 제약조건을 만족하기 위하여 인접된 모선에 설치되는 PV의 용량은 작은 값을 갖는다. 또한 변압기의 역조류 및 용량과 관련된 제약조건으로 인하여 변압기 근처 모선인 'mid858'과 '890'에서는 PV의 용량도 작은 값으로 결과가 산출되었으며 침투율이 100[%] 이상인 경우에는 계통 내 손실이 증가하기 때문에 제약조건을 위반하지 않는 범위 내에서 침투율이 172.5[%]까지 증가한 것을 알 수 있다.

표 4는 목표 모선과 전체 계통의 hosting capacity를 동시에 최적화 하였을 때의 결과이다. 모든 목표 모선의 hosting capacity가 증가한 것을 알 수 있으며 전체 계통의 maximum hosting capacity은 크게 변하지 않고 유지가 되는 것을 알 수 있다. 표 5와 표 6은 주전원과 가장 거리가 먼 'mid838'과 '848' 목표 모선의 PV 용량과 나머지 bus 간의 PV 용량에 대한 상관 계수 값이며 그림 6, 7은 표 5와 6을 substation부터 거리 순서대로 정렬한 그래프이다.

그림 6을 보면 그림 3의 substation과 SVR 2 사이에서는 대체로 양의 상관관계를 갖으며 'mid838'과 거리적으로 가까운 SVR 2 후로는 대체적으로 음의 상관관계를 나타내는 것을 알 수 있다. 'mid838'은 substation으로부터 가장 거리가 먼 모선이므로 변전소와 가까운 거리에 있는 모선들은 'mid838'에 PV가 많이 설치가 된다하더라도 영향을 적게 받기 때문에 뚜렷한 상관관계는 보이지 않는다. 하지만 'mid838'과 가까운 모선들은 상대적으로 영향을 많이 받기 때문에 'mid838'에 많은 PV가 설치가 된다면 그와 가까운 모선들에 설치된 PV들의 용량은 크게 영향을 받을 수밖에 없다. 따라서 'mid838'과 가까운 위치에 뚜렷한 상관관계를 갖는 모선들이 존재하게 된다. 그 결과 목표 모선과의 뚜렷한 음의 상관관계를 갖는 모선을 구별할 수 있고 이와 같은 방법으로 목표 모선에 설치될 PV의 용량을 증가시키기 위해 계통 전체의 maximum hosting capacity를 유지하면서 어떠한 모선에 설치가 된 PV의 용량을 저감시킬 수 있을지 분석할 수 있다. 이와 같은 경우에는 'mid838'에 PV를 기존 설치된 용량에서 최대 설치 가능한 용량까지 설치하기 위해서 'mid838'과 음적 상관계수가 큰 '830', '844'에 설치가 된 PV의 용량을 저감시키면 된다고 분석할 수 있다.

또한 그림 7을 보면 모선 '848'과 뚜렷한 상관관계를 나타내는 모선은 없다는 것을 알 수 있다. 그 결과 모선 '848'에 설치가 되는 PV의 용량은 모선 'mid838'보다 증감량이 적으며 그 이유로는 커패시터 뱅크가 설치가 되어있는 모선이기 때문에 제약조건으로 인하여 많은 PV를 새로 설치할 수 없다고 분석할 수 있다. 따라서 모선 'mid838'은 모선 '848'보다 PV 용량 변화의 가변성이 높다고 할 수 있다.

마지막으로 비 목표모선의 실제 증감량을 확인하기 위하여 'mid838'과 뚜렷한 상관관계를 보이는 모선의 hosting capacity를 확인하였다. 표 7을 보면 상관관계에 따라서 목표모선에 설치된 PV의 용량이 증가하면 나머지 모선의 PV 용량 증감의 방향이 결정되는 것을 알 수 있다. 양적 상관관계인 경우에는 그에 해당하는 모선에서 설치되어지는 PV의 용량이 증가한 것을 알 수 있으며 음적 상관관계인 경우에는 그 반대의 상황이 발생하는

표 7 비 목표 모선들의 PV 용량 실제 증감량

Table 7 Actual increase/decrease of PV capacity for non-target buses

	mid810	mid864	830	844
Correlation coefficient with 'mid 838'	0.30	0.33	-0.32	-0.39
Existing installed PV capacity [kVA]	165	150	95	145
Maximum allowable PV capacity [kVA]	265	270	15	35
Variation [kVA]	+100	+120	-80	-110

것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 유전알고리즘을 통한 전체 계통의 maximum hosting capacity와 목표 모선의 maximum hosting capacity를 구하였다. 또한 목표 모선과 다른 모선간의 hosting capacity에 대한 상관관계를 분석함으로써 목표 모선의 hosting capacity를 증가시키기 위해서 어떤 모선의 PV 용량을 감소시켜야 하는지 알아보았다. 전체 계통의 maximum hosting capacity를 유지하면서 목표 모선의 hosting capacity를 증가시킨 결과 기존의 결과보다 hosting capacity가 크게 증가한 것을 알 수 있었다. 또한 거리에 따른 목표 모선과 다른 모선간의 상관관계를 분석함으로써 어떠한 모선의 PV 용량을 감소시켜야 목표 모선의 PV 용량을 증가시킬 수 있는지 확인할 수 있었다.

이러한 결과는 분산전원의 침투율이 증가하는 이 시대에 계통 설계자와 수용가 모두에게 의미가 있는 결과이며 본 논문의 과정과 결과를 토대로 향후 기존 계통에 분산전원이 도입될 시, 도입 가능한 최대의 용량과 각 수용가의 요구 및 계통 설계자의 요구를 충족시킬 수 있는 결과를 이끌어 낼 수 있을 것이다. 본 연구에서 분석된 상관관계를 이용해서 hosting capacity와 관련된 계통 설계를 정립 또는 국내 실계통 및 PV의 용량을 증가시킴에 따른 계통 내 손실 및 운영비용과 같은 민감도 분석도 진행하기에 용이할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 성과는 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2015 R1A2A1A10052459).

References

- [1] Thomas Ackermann, Goran Andersson, Lennart Soder, "Distributed generation: a definition," December 2000.
- [2] Frede Blaabjerg, Remus Teodorescu, Marco Liserre, Adrian V. Timbus, "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems," IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 53, no. 5, pp. 1398-1409, October 2006.
- [3] EPRI, Distribution Feeder Hosting Capacity: "What Matters When Planning for DER?", April 2015.
- [4] Fei Ding, Barry Mather, Nathan Ainsworth, Peter Gotseff, Kyri Baker, "Locational Sensitivity Investigation on PV Hosting Capacity and Fast Track PV Screening," Transmission and Distribution Conference and Exposition, July 2016.
- [5] Brian M. Adams et al., "Dakota, A Multilevel Parallel Object-Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, and Sensitivity Analysis: Version 6.4 User's Manual," July 2008.
- [6] EPRI, "Reference Guide The Open Distribution System Simulator", March 2016
- [7] John Byrne, Job Taminiau, Lado Kurdgelashvili, Kyung Nam Kim, "A review of the solar city concept and methods to assess rooftop solar electric potential, with an illustrative application to the city of Seoul," Renewable and Sustainable Energy Reviews 41, August 2014.
- [8] NREL Solar Radiation Research Laboratory (http://www.nrel.gov/midc/srrl_bms/)
- [9] Barry A. Mather, "Quasi-Static Time-Series Test Feeder for PV Integration Analysis on Distribution Systems," Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE, July 2012.
- [10] Attia A. El-Fergany, Almoataz Y. Abdelaziz, "Efficient heuristic-based approach for multi-objective capacitor allocation in radial distribution networks," IET Generation, Transmission & Distribution, May 2013.
- [11] Bonface Oduor Ngoko, Hideharu Sugihara, Tsuyoshi Funaki, "A Short-Term Dynamic Thermal Rating for Accommodating Increased Fluctuations in Conductor Current due to Intermittent Renewable Energy," 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Conference, Engineering in Japan, Vol. 161, No. 2, December 2016.
- [12] J. S. Kim et al., "Development of ESS Control Algorithm for Smoothing the Output of Renewable Energy using Pearson's Correlation Coefficient", The Transactions of the KIEE, vol. 30, no. 9, pp. 33-39, September, 2016.

저 자 소 개



김 지 수 (Ji-Soo Kim)

He received a B.S degree from the College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Republic of Korea, in 2016. At present, he is enrolled in the combined master's and doctorate program. His research interests include power system transients, wind power generation and distributed energy resource.

Tel : (031)290-7166

Fax : (031)299-4137

E-mail : kjs7107@naver.com



오 윤 식 (Yun-Sik Oh)

He received a B.S and M.S. degree from the College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Republic of Korea, in 2011 and 2013. At present, he is working on his Ph.D. thesis. His research interests include power system transients, protection and stability

Tel : (031)290-7166

Fax : (031)299-4137

E-mail : fivebal2@naver.com



조 규 정 (Gyu-Jung Cho)

He received a B.S and M.S. degree from the College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Republic of Korea, in 2012 and 2014. At present, he is working on his Ph.D. thesis. His research interests include power system transients, protection and power system relaying

Tel : (031)290-7166

Fax : (031)299-4137

E-mail : thug1220@naver.com



김 민 성 (Min-Sung Kim)

She received a B.S degree from the College of Engineering, Myongji University Republic of Korea, in 2015. At present, she is enrolled in the combined master's and doctorate program. Her research interests include power system transients analysis, protection scheme and renewable energy.

Tel : (031)290-7166

Fax : (031)299-4137

E-mail : lovelykiku25@naver.com



김 철 환 (Chul-Hwan Kim)

He received a B.S and M.S. degree from the College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Republic of Korea, in 1982 and 1984, respectively. He received a Ph.D. degree in electrical engineering from Sungkyunkwan University in 1990. In that same year, he joined Jeju National University, Jeju, Republic of Korea as a full-time lecturer. He was a visiting academic at the University of Bath, UK, in 1996, 1998, and 1999. Since March 1992, he has been a professor in the College of Information and Communication, Sungkyunkwan University, Republic of Korea. His research interests include power system protection, the application of artificial intelligence to protection and control, the modeling/protection of underground cables, and EMTP software.

Tel : (031)290-7166

Fax : (031)299-4137

E-mail : hmwkim@hanmail.net