

분산전원을 포함하는 시스템 운영 플랫폼을 위한 송배전 통합 해석 하이브리드 알고리즘 개발

(Development of a Transmission/Distribution Integrated Analysis Hybrid Algorithm for System Operation Platform Including Distributed Generation)

송중석* · 서재완 · 장문종 · 장길수**

(Chong-Suk Song · Jae-Wan Suh · Moon-Jong Jang · Gil-Soo Jang)

Abstract

Owing to the increase in the penetration of distributed generation the DGs connected to the distribution system have an effect on the system conditions of the transmission system and neighboring distribution systems. This makes the separate analysis of the transmission and distribution system no longer valid and requires the consideration of both the system in the analysis process. This paper proposes a transmission/distribution integrated analysis hybrid algorithm that would ensure the accurate analysis of the system by reflecting the results of the transmission and distribution system analysis on each other.

Different scenarios are being analysed in order to verify the effectiveness of the hybrid algorithm by observing the effects of the DG connected distribution system on the transmission system and neighboring distribution systems. The algorithm and simulations performed are being conducted by MATLAB and the IEEE 30 bus system and a test distribution system has been utilized for the transmission and distribution systems respectively.

Key Words : Transmission and Distribution System Integrated Analysis, Power Flow, Distributed Generation, MATLAB

* 주저자 : 고려대학교 전기공학과 박사과정
** 교신저자 : 고려대학교 전기공학과 교수
* Main author : Ph.D. Candidate, School of Electrical Engineering, Korea University
** Corresponding author : Professor, School of Electrical Engineering, Korea University
Tel : 02-3290-3675, Fax : 02-3290-3692
E-mail : gjang@korea.ac.kr
접수일자 : 2012년 9월 11일
1차심사 : 2012년 9월 13일
심사완료 : 2012년 10월 12일

1. 서론

기존 계통해석 방법론에서는 배전계통에서 발생하는 과도현상의 영향이 작아 송전급 해석을 고려하지 않았으며 배전급 해석에서는 송전계통은 이상전원에 가까운 일정 전압원으로 간주하여 해석하였다. 하지

만 분산전원의 가변적인 특성은 인접 송전 또는 배전 계통에 영향을 미치고 계통에 이러한 분산전원의 보급이 점점 증가하게 되면서 이러한 영향이 무시할 수 없는 수준이 되어 기존 계통해석 알고리즘으로는 부정확한 해석결과를 초래할 수 있게 된다. 이러한 문제의 해결방안으로 송전과 배전을 실제와 같이 하나의 계통으로 해석할 수 있고 서로의 영향을 반영할 수 있도록 하는 송배전 통합해석 방법론의 개발이 필요하게 된다[1-2].

기존 전력계통에서는 중앙 집중형 구조로 몇 개의 대규모 발전소에서 최종부하로 전력이 단방향으로 흘러 계통의 설비 및 보호 시스템 등 전체의 시스템이 기존의 전력계통의 특성에 맞춰 설계되어 있다. 하지만 분산전원의 비중이 커짐으로 인해 배전망에 전력을 충분히 공급할 뿐만 아니라 상위 계통으로 조류가 역송전되어 인근계통에 미치는 영향에 대한 검토가 필요하다. 현재 분산전원은 주로 태양광과 풍력이 주를 이루고 있으며 태양광 같은 경우에는 일반적으로 단위 역률로 운전되고 있고 풍력은 타입에 따라 약간 차이가 있지만 일반적으로 무효전력을 소모하게 된다. 태양광 같은 경우에는 인버터를 거쳐서 계통에 연계가 되며 이러한 인버터의 특성을 이용하여 무효전력을 공급 또는 흡수할 수 있다[4]. PV 시스템의 인버터를 어떻게 제어하느냐에 따라 계통의 상황이 달라지고 발전원의 다양한 운전 조건에 의해 인근계통에 어떠한 영향을 미치는지를 정확하게 분석하려면 송배전 통합 해석을 통해 배전계통을 송전계통 해석에 반영할 필요성이 있다.

본 논문에서는 분산전원이 연계된 계통에서 송전계통 및 배전계통 간의 영향 분석과 정확한 해석을 보장하기 위해서 송배전 통합해석 하이브리드 알고리즘을 제안하고 있다. 또한 해당 알고리즘을 이용하여 분산전원의 다양한 운전상태를 적용한 시나리오를 통해 인근 송전 및 배전계통에 미치는 영향을 분석하였다. 본 알고리즘은 MATLAB을 이용하여 모의하였으며 송전계통은 IEEE 30모선 계통을 활용하고 있으며 배전계통 같은 경우에는 테스트 배전계통을 활용하고 있다.

2. 본 론

2.1 송배전 통합 해석 하이브리드 알고리즘

현재 전력계통 해석에서는 송전 및 배전계통의 개별적인 해석으로 인해 각 계통의 상황을 정확하게 반영하는데 한계가 있다. 기존의 배전사업자(Distribution system operator) 및 송전사업자(Transmission system operator)의 운영방식은 서로 독립적인 형태로 이루어지고 있고 해석 또한 구분되어서 해석되어 왔다. 기존 배전계통에서는 방사형 계통으로 조류가 단방향으로 흐르기 때문에 배전계통이 실제로 송전계통에 미치는 영향이 없거나 미미했으므로 지금까지 이러한 개별적인 해석이 가능하였다. 하지만 변동성이 심한 분산전원이 배전계통에 차지하는 비율이 증가하게 되면서 실제로 이러한 분산전원이 조류의 흐름, 시스템 전압 등에 영향을 미치기 때문에 배전계통이 송전계통에 미치는 영향을 고려할 필요성이 있다.

현재의 시스템 운영 방식에서는 다수의 분산전원이 배전계통에 연계가 되었을 때 분산전원이 무효전력을 공급할 수 있음에도 분산전원이 전압 제어를 하지 않고 있다[3]. 그러나 실제로 송전 및 배전계통 간의 협조 제어가 이루어지게 되면 전체의 계통을 더 효율적으로 운영할 수 있고 전압, 무효전력 및 전력 손실 측면에서 최적의 운전 상태를 도출할 수 있게 된다.

제어 가능한 분산전원을 계통 운영에 활용하게 되면 배전계통의 전압을 제어할 뿐만 아니라 적절한 운전 상태를 통해 계통의 손실을 줄일 수 있게 된다. PV 시스템에 사용되고 있는 인버터는 이론적으로는 유효전력량 만큼 무효전력을 공급할 수 있는 능력을 가지고 있다[4-6]. 그림 1은 인버터 기능 모델을 보여주고 있으며 인버터로 인해 무효전력이 출력되는 범위를 나타내고 있다. 이러한 PV 인버터 제어를 적절하게 활용하게 되면 계통상태에 따라 무효전력을 공급 또는 소모를 하여 전압 레벨을 조정할 수 있게 되고 계통 손실 또한 줄일 수 있게 된다.

분산전원이 계통에 차지하는 비중이 커지게 되면 계

통자원의 효율적인 운영을 위해서는 분산전원을 계통 운영에 참여하는 것이 고려되어야 하며 이러한 무효 전력 제어가 계통에 미치는 영향은 사실상 해당 배전 계통에만 국한되는 것이 아니라 전체 시스템 관점에서 분석해야 하기 때문에 더 이상 송전 및 배전계통의 개별적인 해석이 유효하지 않다. 뿐만 아니라 뒤에서 송배전 통합 해석을 통하여 여러 가지 시나리오를 통하여 살펴볼 수 있겠지만, PV 시스템이 전압 제어를 하지 않고 단위 역률에 운전을 하더라도 계통에 상당한 영향을 끼치는 것을 확인할 수가 있다.

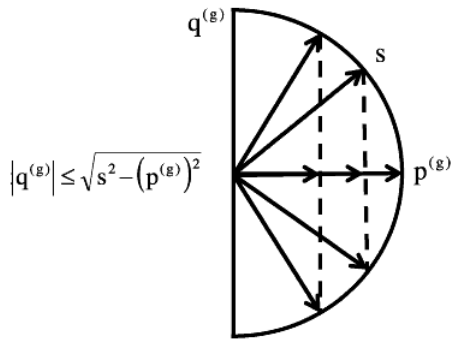


그림 1. PV 인버터 기능 모델[2]
Fig. 1. PV Inverter capability model[2]

송배전 통합 해석 하이브리드 알고리즘의 기본적인 개념은 송전계통 및 배전계통 해석 각각의 결과를 서로 반영하여 이러한 통합적인 해석이 가능하도록 매개 역할을 해주는 것이다. 여기서 송전계통 조류계산은 단상 Newton-Raphson method을 사용하고 있으며 배전계통 조류계산은 3상 Current Injection Method을 활용하고 있다[7]. 송배전 통합 해석 하이브리드 알고리즘의 단계별 절차는 다음과 같다.

1. 계통 데이터 입력
2. Y(어드미턴스)행렬 구성
3. 전력 조류 방정식 구성

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (1)$$

$$f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

$$\vdots$$

$$f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

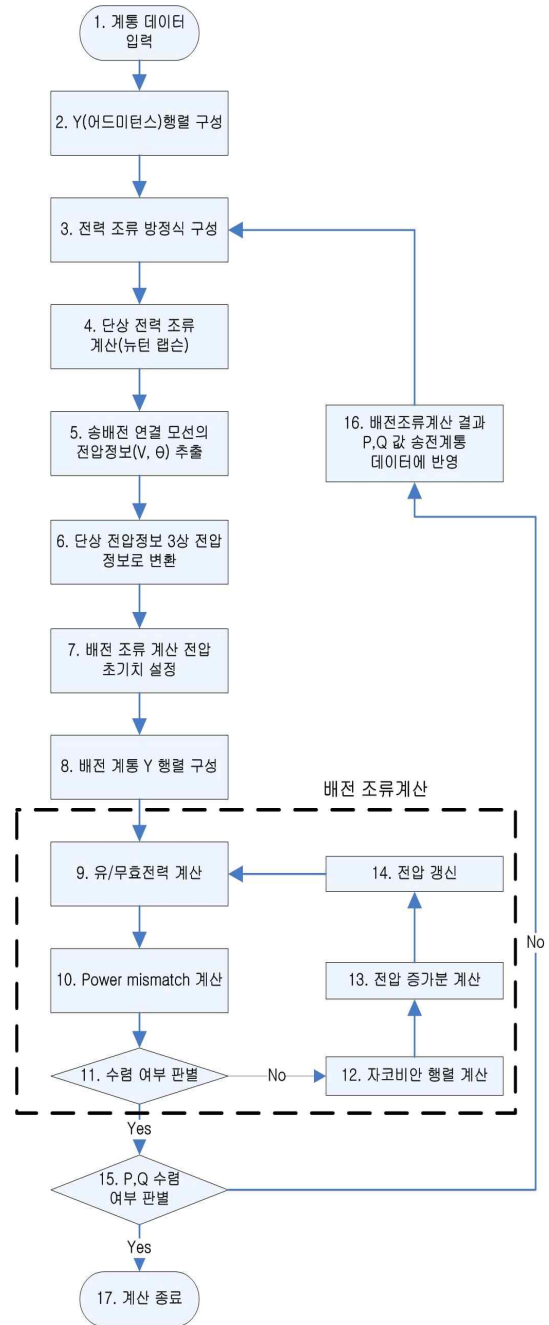


그림 2. 송배전 통합해석 하이브리드 알고리즘 순서도
Fig. 2. Flowchart of the transmission/distribution system integrated analysis hybrid algorithm

4. 단상 전력 조류 계산(뉴턴 랩슨)
5. 송배전 연결 모선의 전압정보(V, θ) 추출
6. 단상 전압정보 3상 전압 정보로 변환

$$V_a = V_b = V_c \quad (2)$$

$$\theta_a = \theta_b + 120^\circ = \theta_c + 240^\circ \quad (3)$$

여기서 V_a 와 θ_a 는 단상 송전 전력 조류 계산을 통해 얻어진 값이다. 한편 단상 송전 전력 조류 계산에서 각 배전단의 부하 S_D 는 다음과 같이 계산된다.

$$S_D = S_{D_u} + S_{D_b} + S_{D_c} \quad (4)$$

7. 배전 조류 계산 전압 초기치 (5의 전압 정보) 설정
8. 배전 계통 Y 행렬 구성
9. 유효/무효전력 계산

$$(P_k^{calc})^s = V_{rk}^s (I_{rk}^{calc})^s + V_{mk}^s (I_{mk}^{calc})^s \quad (5)$$

$$(Q_k^{calc})^s = V_{mk}^s (I_{rk}^{calc})^s + V_{rk}^s (I_{mk}^{calc})^s \quad (6)$$

10. Power mismatch 계산

$$\Delta P_k^s = (P_k^{sp})^s - (P_k^{calc})^s \quad (7)$$

$$\Delta Q_k^s = (Q_k^{sp})^s - (Q_k^{calc})^s \quad (8)$$

11. 수렴 여부 판별, 수렴시 15번 단계

$$\max(|\Delta P_k^s|) \leq \varepsilon_p \quad (9)$$

$$\max(|\Delta Q_k^s|) \leq \varepsilon_q \quad (10)$$

12. 자코비안 행렬 계산
13. 전압 증가분 계산
14. 전압을 갱신하여 9번 단계를 수행

$$(V_k^{abc})^{h+1} = (V_k^{abc})^h + (\Delta V_k^{abc})^h \quad (11)$$

$$(V_k^{abc}) = [V_{rk}^a \ V_{rk}^b \ V_{rk}^c \ V_{mk}^a \ V_{mk}^b \ V_{mk}^c]^t \quad (12)$$

15. 수렴 여부 판별, 비 수렴시 2번 단계 수행

$$\Delta P, \Delta Q < \varepsilon \quad (13)$$

16. 배전조류계산 결과 P,Q값 공전계통 데이터에 반영
17. 종료

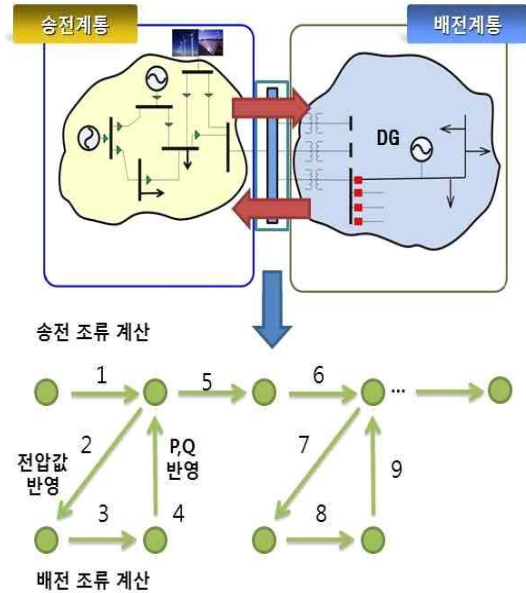


그림 3. 송배전 통합 해석 하이브리드 알고리즘 기본 개념도

Fig. 3. Basic concept of Transmission/Distribution integrated hybrid analysis algorithm

송배전 통합 해석 하이브리드 알고리즘의 순서도는 그림 2에서 볼 수 있다. 순서도에서 보듯이 먼저 송전계통 조류계산(3, 4번)을 수행하고 결과에서 송배전 계통 연결모선의 전압정보를 3상 조류계산에 적합하게 변환(5, 6번)하여 배전조류계산을 실시한다. 9~14 단계는 배전조류계산에 해당되며 수렴조건이 만족할 때까지 반복 수행한다. 배전조류계산을 통해 계산된 P,Q정보를 송전계통 조류계산에 반영하고 (15, 16번) 배전계통에서 계산된 P,Q와 이전 송전계통 조류계산에서 사용된 P,Q값이 수렴할 때까지 3~16번의 절차를 반복 수행한다. 그림 3은 송배전 통합해석 하이브리드 알고리즘의 기본 개념도를 보여주고 있으며 순서도를 간략화시킨 것이다. 여기서 1단계는 송전 조류계산 단계이고 2단계는 인터페이스 모선에서의 전압 정보(V, θ)를 3상으로 변환하여 배전계통에 정보를 업데이트하는 단계에 해당한다. 3단계에서는 배전 조류계산을 실시하고 4단계에서는 새로운 유효/무효전력 값 즉, mismatch를 계산하여 송전계통에 반영한다. 이러한 과정을 식 (8, 9)에서의 ΔP 및 ΔQ 가 어느 지정된 ε 이하로 떨어질 때까지 반

복한다.

그림 3에서 1번은 그림 2의 3, 4번 (송전조류계산)에 해당되고 2번은 5, 6번에 해당된다. 3번은 9~14번에 (배전계통 반복조류계산) 해당하고 4번은 15, 16번에 (P,Q 정보 송전계통 반영) 해당한다. 5번은 다음의 송배전 통합 해석 iteration 단계로의 이동을 의미하고 6~9은 1~4에 대한 두 번째 iteration에 대한 절차를 보여준다.

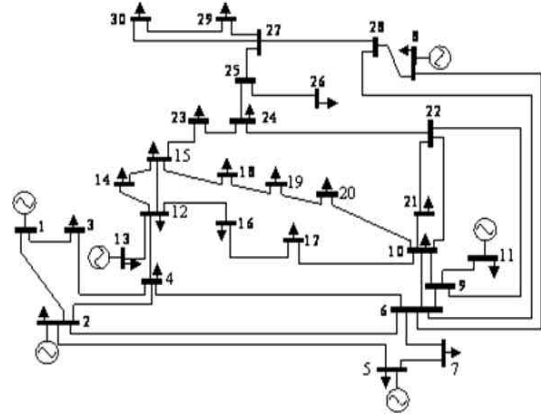


그림 4. IEEE 6기 30모선 단상 계통도
Fig. 4. Single line diagram of the IEEE 6-generator 30-bus system

표 1. 10번 모선에 연계된 배전계통 계통 부하정보(p.u.)

Table 1. Load information of the distribution system connected to bus 10(p.u.)

모선 번호	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'	11'
A상부하 (p.u.)	0	0.0087 +0.0056i	0.0044 +0.0028i	0	0.0058 +0.0037i	0.0175+0.0111i	0	0	0	0.00087 +0.0056i
B상부하 (p.u.)	0	0.0087 +0.0056i	0.0044 +0.0028i	0	0.0058 +0.0037i	0	0	0	0	0.00087 +0.0056i
C상부하 (p.u.)	0	0.0087 +0.0056i	0.0044 +0.0028i	0	0.0058 +0.0037i	0	0	0	0	0.00087 +0.0056i
모선 번호	12'	13'	14'	15'	16'	17'	18'	19'	20'	21'
A상부하 (p.u.)	0.0073 +0.0047i	0	0	0	0	0	0.00116 +0.0075i	0.0015 +0.0010i	0	0
B상부하 (p.u.)	0.0073 +0.0047i	0	0	0.0062 +0.0039i	0	0	0.00116 +0.0075i	0.0015 +0.0010i	0	0
C상부하 (p.u.)	0.0073 +0.0047i	0	0	0	0.0070 +0.0045i	0	0.00116 +0.0075i	0.0015 +0.0010i	0	0

표 2. 10번 모선에 연계된 배전계통 계통 배전선로정보(p.u.)

Table 2. Distribution line information of the distribution system connected to bus 10(p.u.)

From	1'	2'	2'	2'	5'	5'	5'	8'	9'	10'
To	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'	11'
임피던스 (p.u.)	0.0537 +0.0853i	0.0090 +0.0142i	0.0090 +0.0142i	0.0358 +0.0569i	0.0179 +0.0285i	0.0179 +0.0285i	0.0358 +0.0569i	0.0537 +0.0853i	0.0179 +0.0285i	0.0125 +0.0199i
From	10'	10'	13'	14'	14'	14'	17'	17'	17'	20'
To	12'	13'	14'	15'	16'	17'	18'	19'	20'	21'
임피던스 (p.u.)	0.0090 +0.0142i	0.0537 +0.0853i	0.0358 +0.0569i	0.0054+0.0085i	0.0107 +0.0171i	0.01790 +0.0285i	0.0054 +0.0085i	0.0036 +0.0057i	0.0179 +0.0285i	0.0179 +0.0285i

표 3. 송배전 통합해석 하이브리드 알고리즘의 검증

Table 3. Verification of transmission/distribution integrated analysis hybrid algorithm

모선	10번 배전만 송배전 통합해석		21번 배전만 송배전 통합해석		10,20,21번 배전만 송배전 통합해석		송전 조류 계산		PSS/e를 통한 송전 조류계산 검증	
	전압 (p.u.)	위상각 (deg)	전압 (p.u.)	위상각 (deg)	전압 (p.u.)	위상각 (deg)	전압 (p.u.)	위상각 (deg)	전압 (p.u.)	위상각 (deg)
10	1.02578	-16.061	1.02612	-16.120	1.02599	-16.129	1.0259	-16.054	1.02604	-16.140
20	1.00902	-16.935	1.00930	-16.989	1.00917	-16.997	1.0091	-16.928	1.00921	-17.014
21	1.01261	-16.520	1.01298	-16.596	1.01285	-16.604	1.0127	-16.513	1.01296	-16.631

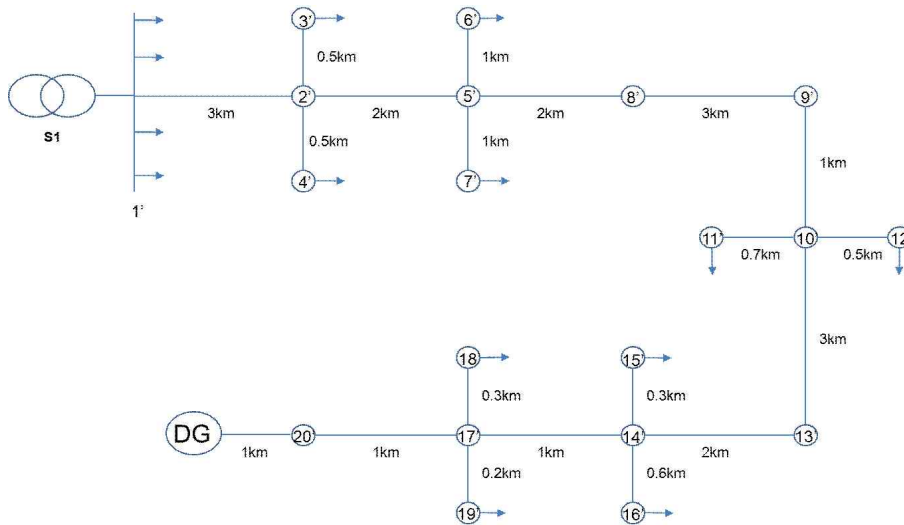


그림 5. 10번 모선에 연계된 배전계통 단상 계통도

Fig. 5. Single line diagram of the distribution system connected to bus 10

표 4. 분산자원 역률 조정에 의한 전체 시스템 유효/무효전력 손실

Table 4. System active/reactive power loss due to adjustment of power factor

PF lead / 전체손실	1	0.95 (lead)	0.9	0.85	0.8	0.75
계통 전체 유효 손실(MW)	0.1717	0.1708	0.1723	0.1743	0.1765	0.1788
계통 전체 무효 손실(MVAR)	0.6364	0.6362	0.6432	0.6515	0.6604	0.6697
PF lag / 전체손실	1	0.95 (lag)	0.9	0.85	0.8	0.75
계통 전체 유효 손실(MW)	0.1717	0.18	0.1858	0.1914	0.197	0.2026
계통 전체 무효 손실(MVAR)	0.6364	0.6619	0.6809	0.699	0.717	0.735

표 5. 송전계통 전압크기(사례 2 : 저전압 현상 모의)

Table 5. Transmission system voltage magnitude(Case 2 : Low voltage phenomenon)

모선 번호	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
전압크기 (p.u.)	1.045	1.02774	1.02022	1.01	1.01414	1.00470	1.01	1.03120	1.01417	1.082
모선 번호	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
전압크기 (p.u.)	1.03038	1.071	1.01438	1.00947	1.01619	1.00947	0.99863	0.99543	0.99932	1.00154
모선 번호	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
전압크기 (p.u.)	1.00154	1.00210	0.99743	0.98502	0.96674	0.99083	1.00979	0.97027	0.95838	

2.2 송배전 통합해석 하이브리드 알고리즘 검증

송배전 통합해석 하이브리드 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해서는 송전계통 상용해석 툴인 PSS/e를 이용하여 송전 조류계산 결과를 비교하였다. 이러한 검증과정을 위해서는 대상계통은 IEEE 6기 30모선 테스트 계통을 활용하였고 배전계통은 예제계통을 활용하였다. 그림 4는 IEEE 6기 30모선의 단상 계통도를 보여주고 있고 송배전 통합해석을 위해서 10, 20 및 21번 모선에 연결된 부하의 값을 이용하여 배전계통에 해당 부하를 분배해서 알고리즘을 적용하였다. 그림 5는 송전계통의 10번 모선에 연계된 배전계통의 단상 계통도를 보여주고 있으며 표 1, 2는 배전계통의 부하 및 선로정보를 보여주고 있다. 여기서 배전계통의 모선번호가 송전계통의 모선번호와의 혼동을 방지하기 위해 1'과 같은 방식으로 구분하였다. 송전계통의 20 및 21번 모선에 연계된 배전계통은 10번 배전계통과 비슷한 방식으로 계통도를 구성하였다. 송배전 통합해석결과 및 순수 송전 조류 계산 결과에 대한 비교는 표 3에서 확인할 수 있다. 여기서 순수 송전 조류 계산에서는 mismatch를 적용한 부하 값을 이용한다.

표 3을 확인하게 되면 송배전 통합 해석 하이브리드 알고리즘을 이용하여 송전계통 및 배전계통을 통합해

석하게 되면 모선전압의 데이터가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있으며 해당 알고리즘에 대한 유효성을 검증할 수 있다. 이러한 검증 하에 분산전원을 적용하여 다양한 시나리오를 적용해서 분산전원의 비율이 높은 배전계통이 송전계통 및 인근 배전계통에 어떠한 영향을 미치는지 확인할 수 있게 되며 해당 시뮬레이션에 대한 결과는 2.3절에서 확인할 수 있다.

2.3 분산전원을 고려한 송배전 통합해석

분산전원을 배전계통에 투입했을 때 송배전 통합 관점에서 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해서 다양한 사례들을 적용하였고 사례들은 다음과 같이 정리할 수 있다. 다음의 시뮬레이션에서는 내용의 일관성을 위해 PV 시스템을 적용하였다.

사례 1 : 분산전원 역할 변경에 따른 송전계통 영향 분석 : 진상 및 지상 운전에 따른 전압 프로파일 분석 및 전체 계통의 유효/무효전력 손실 분석

사례 2 : 송전계통 10번 모선에 연계된 배전계통의 분산전원이 0.8 지상 운전할 경우 저전압 현상 모의

사례 3 : 다수의 배전계통에 분산전원 투입시 과전압 발생(단위 역할 운전 조건)

2.3.1 분산전원 역률 변경에 따른 송배전 영향 분석 : 진상 및 지상 운전에 따른 전압 프로파일 분석 및 전체 계통의 유효/무효전력 손실 분석

배전계통에 PV 시스템을 분산전원으로 연계하여 시뮬레이션을 진행하였다. 해당 사례의 시뮬레이션 목적은 분산전원이 진상 또는 지상운전을 하였을 때 분산전원이 연계된 배전계통에 인접한 송전계통 모선전압 변화 및 전체 계통 손실변화 등에 대한 송배전 통합 관점에서의 영향 분석이다. 분산전원은 송전계통의 10번 모선에 연계된 배전계통에 연계되었으며 송전계통 관찰모선은 10번 모선에 연계된 배전계통에 인접되어 있는 송전계통의 17, 20, 21 모선으로 지정하였다. 분산전원의 위치는 배전계통의 말단 주변에 분산되어 위치되어 있고 총 용량이 30MVA이며 시뮬레이션의 편의상 분산전원을 lumped 형태로 적용하였다. 그림 6는 분산전원의 역률을 1에서부터 0.75 진상으로 조정하게 될 때의 인접 송전계통 전압 변화를 나타내고 있다. 그림 6을 살펴보면 역률이 1에서 0.95로 조정되면 인접 모선 전압이 크게 상승하는 것을 확인할 수 있고 역률 조정하게 될 때 생기는 10번 모선의 전압차가 0.0102 p.u.가 되는 것을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라 인접 지역의 전압 또한 0.0089-0.01 정도의 전압차를 가지는 것을 확인할 수 있다. 표 4는 이러한 역률 조정으로 인해 생기는 전체 계통 유효/무효전력 손실변화를 보여주고 있고 0.95 진상 운전으로 운전점을 변경하게 되면 전체 시스템의 손실이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

같은 방식으로 분산전원의 역률을 1에서 0.75 지상으로 조정하여 같은 모선에 대하여 전압 변화 및 전체 계통 손실을 관찰하였다. 그림 5는 역률을 1에서 0.75지상으로 조정했을 때의 송전계통 모선전압 변화이고 표 4에 역률 조정에 따른 계통 손실을 보여주고 있다. 마찬가지로 역률이 1에서 0.95지상으로 조정되었을 때 계통전압이 크게 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 10번 송전계통 모선 전압의 변화가 0.0117 p.u이며 기타 모선 전압의 변화가 0.0097-0.0112 p.u이다.

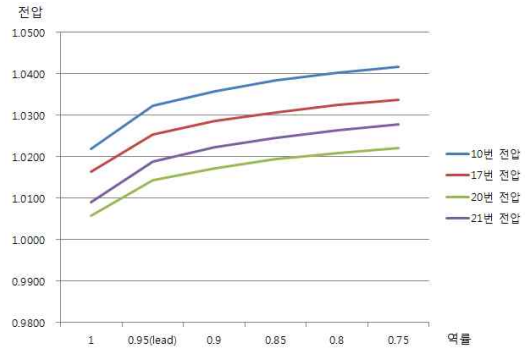


그림 6. 분산전원 역률 조정(진상)으로 인한 인접 송전계통 모선전압 변화

Fig. 6. Change in neighboring transmission system bus voltage owing to adjustment of power factor(leading)

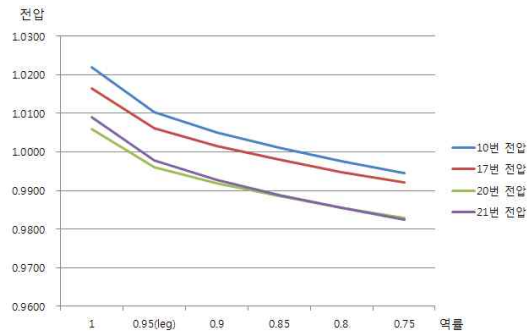


그림 7. 분산전원 역률 조정(지상)으로 인한 인접 송전계통 모선전압 변화

Fig. 7. Change in neighboring transmission system bus voltage owing to adjustment of power factor(lagging)

2.3.2 송전계통 10번 모선에 연계된 배전계통의 분산전원이 지상 운전할 경우 저전압 모의

본 절에서는 분산전원이 지상운전을 하였을 때 송전계통 및 다른 인근 배전계통에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 시뮬레이션 시나리오를 구성하였다. 위와 마찬가지로 10번 송전계통에 연계된 배전계통에 분산전원을 연계하였고 분산전원이 0.8 지상으로 운전하고 총 용량이 20MVA이다. 분산전원에 의해 생기는 영향을 살펴보기 위해서 먼저 분산전원이 연계되지 않을 경우의 사례를 시뮬레이션하였다. 그림 8은 분산전원이 연계되지 않았을 때의 10, 20, 21번 모선에 연계된

배전계통의 전압 프로필을 보여주고 있다. x축은 모선 번호를 나타내고 있으며 모선번호의 크기가 커질수록 말단에 가까워진다. 그림 9은 0.8 지상운전중인 20MVA 규모의 분산전원이 투입되었을 때 생기는 전압 프로필 변화를 보여주고 있다. 분산전원이 연계된 배전계통은 10번 송전모선에 연계된 배전계통이지만 실제로 21번 모선에 연계된 배전계통에서 저전압 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

표 5을 10번 모선 배전계통에 분산전원 총 용량 20MVA가 연계되었을 때의 송전계통 각 모선의 전압크기를 보여주고 있다. 해당정보를 살펴보게 되면 송전계통의 10, 20, 21번 모선은 각각 1.01417, 0.99932, 1.00154 p.u.로 송전계통의 전압 크기는 1.0 p.u. 근방에 형성되는 것을 확인할 수 있게 되고 송전계통 해석만으로는 계통에 아무런 문제가 없는 것을 확인할 수 있게 된다.

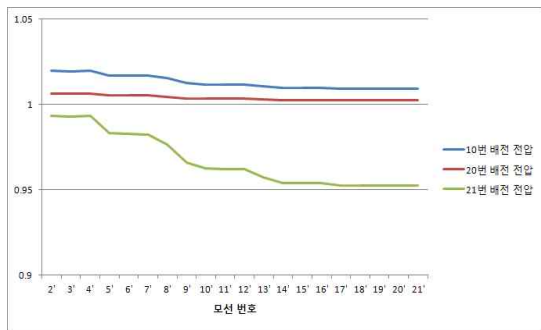


그림 8. 분산전원이 연계되지 않았을 때의 배전계통 전압 프로필
Fig. 8. Voltage profile of the distribution systems when DG is not connected

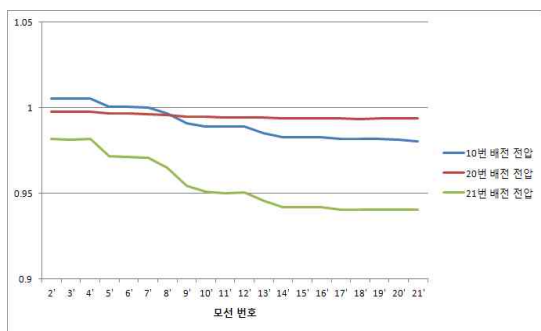


그림 9. 분산전원 연계로 인한 인근 배전계통 저전압 현상
Fig. 9. Low voltage due in neighboring distribution system due to DG connection

2.3.3 다수의 배전계통에 분산전원 투입시 과전압 발생(단위 역률 운전 조건)

본 절에서는 분산전원이 차지하는 비중이 커지게 되면 단위역률로 운전하였을 경우에 인근 배전계통에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 시뮬레이션 시나리오를 구성하였다. 여기서 분산전원은 10, 20, 21번 모선에 연계되어 있으며 용량은 각 배전단의 피크 부하의 80%로 세팅되어 있다. 그림 10은 부하량이 피크 부하의 45% 수준일 경우의 배전계통 전압 프로필을 보여주고 있으며 21번 배전계통의 말단에서 과전압 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있게 된다.

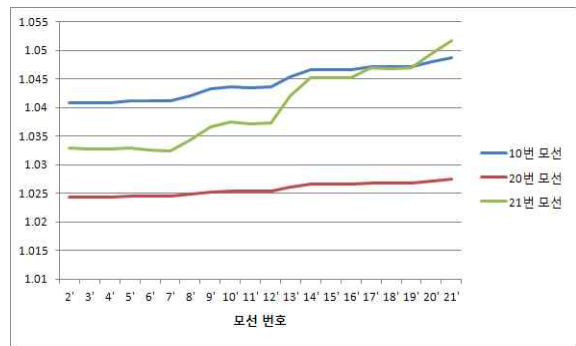


그림 10. 단위 역률 운전 중인 분산전원으로 인한 과전압 현상
Fig. 10. Overvoltage due to DG operating at unity power factor

2.3.4 결과 정리

분산전원의 역률을 조정하게 되면 지상 또는 진상 운전에 따라 전압을 감소 또는 상승시킬 수 있게 되는 것은 자명한 일이다. 하지만 배전계통의 전압을 조정하기 위해서 역률 조정을 하게 되면 해당 배전계통의 전압 프로필이 개선될 수 있겠지만 인접 송전계통 또는 배전계통에 영향을 미치기 때문에 이러한 전압 조정으로 인해 주변의 영향이 어느 정도가 되는지 확인하기 위해 송배전 통합해석의 필요하게 된다. 전체적인 시스템 운영 측면에서 보았을 때 주어진 모든 자원을 최대한 활용하기 위해서는 송전/배전계통을 통합적으로 고려하여 전체적인 전력손실 및 전압 측면에서 최적의 운영 조건을 도출해 낼 수 있다.

사례 2를 살펴보게 되면 분산전원이 투입된 곳은 송전계통의 10번 모선에 연계된 배전계통이지만 21번 모선에 연계된 배전계통 안에서 저전압 현상이 발생한다. 저전압 현상이 발생하는 21번 모선의 배전계통의 송전단 전압은 1.00154의 전압 크기를 갖는 것을 확인할 수 있어 송전계통 해석 또는 단일 배전계통 해석으로만 전체 계통의 전압 레벨이 적절하게 유지가 되는지 확인하는데 한계가 있다. 또한 사례 3처럼 분산전원이 계통에 차지하는 비중이 커지게 되면 PV 시스템 같은 분산전원이 별도의 전압 조정 없이 단위 역률로 운전하는 것만으로도 인접지역에 있는 분산전원의 영향과 중첩되어 과전압이 발생하는 것을 확인할 수가 있다. 또한 분산전원이 시시각각으로 변하기 때문에 계통의 상황에 따라 계통의 최적운전 조건이 바뀐다. 따라서 본 논문에서는 이러한 필요성을 토대로 송배전 통합해석 하이브리드 알고리즘을 개발하여 분산전원 환경에서의 전체 계통의 정확한 해석 기반을 마련한 것이다.

3. 결 론

본 논문에서는 배전계통에 연계된 분산전원증가로 인해 생기는 기존 송전 및 배전계통 개별 해석 방식에 대한 한계점을 보완하기 위해 송배전 통합 하이브리드 알고리즘을 제안하였다. 이러한 알고리즘의 유효성을 검증하기 위하여 분산전원이 연계된 계통에서 다양한 시나리오를 통하여 전체 계통에 어떠한 영향을 미치는지 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 본 논문에서는 3가지의 대표적인 사례를 통하여 시뮬레이션을 진행하였고 다음과 같이 결과를 요약할 수 있다.

- 1) 분산전원(PV 시스템 등)의 역률을 조정하게 되면 인접지역의 송전계통 모선전압이 상승 또한 감소하게 되어 역률에 따른 전압변화의 크기 및 계통 전체의 손실이 최소화되는 운전점을 구할 수 있다.
- 2) 분산전원이 지상으로 운전하였을 때 인접 송전계통 모선전압이 감소되는 것뿐만 아니라 인접 배전계통에도 영향이 파급되어 다른 배전계통에서의

저전압 현상을 경험할 수 있게 된다. 송전계통 해석으로만 전압을 분석하게 되면 전압 레벨이 적절하게 유지가 되는지 확인할 수 없어 이러한 송배전 통합해석에 대한 필요성이 대두된다.

- 3) 분산전원(PV 시스템)이 계통에 차지하는 비중이 커지게 되면 단위 역률로 운전하게 되더라도 과전압 현상이 발생하게 되는 것을 확인할 수 있게 된다. 이러한 과전압 현상을 정확하게 해석하기 위해서는 배전계통 서로의 영향에 대하여 반영해야 하기 때문에 이러한 측면에서도 송배전 통합 해석에 대한 필요성이 요구된다.

분산전원이 앞으로도 계속 보급될 것이며 이러한 분산전원이 시스템 안에서 안정적으로 운영하기 위해서는 주어진 자원을 최대한 활용하며 계통의 최적 운전 상태를 도출해야 하며 이러한 송배전 통합 해석 하이브리드 알고리즘을 이용하여 분산전원 연계에 의한 문제점을 분석하여 적절한 보상대책을 만들 수 있는 기반을 마련해줄 수 있게 된다. 향후 연구에서는 이러한 분산전원 환경 하에 통합적인 측면에서 전압/무효전력 및 전력손실 등을 관리하는 통합 운영 시스템이 개발이 필요할 것이며 이러한 통합 운영 시스템을 지원하는 여러 가지의 어플리케이션에 대한 개발이 요구될 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국동서발전(주)의 지원에 의하여 기초전력연구원(12103)주관으로 수행된 과제이고 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(20120006275).

References

- [1] H. B. Sun, B. M. Zhang, "Global state estimation for whole transmission and distribution networks", *Electric Power Systems Research*, Vol. 74, 2005, pp. 187-195.
- [2] H. B. Sun, B. M. Zhang, "Distributed power flow calculation for whole networks including transmission and distribution", *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2008, pp. 1-6.
- [3] IEEE Std 1547.4-2011, "IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems", IEEE, 2011, pp. 1-54.

- [4] K. Turitsyn, P. Sulc, S. Backhaus, M. Chertkov "Options for Control of Reactive Power by Distributed Photovoltaic Generators", Proc of the IEEE, Vol. 99, No. 6, 2011, pp. 1063-73.
- [5] K. Turitsyn, P. Sulc, S. Backhaus, M. Chertkov, "Local control of reactive power by distributed photovoltaic generators", Proc. IEEE SmartGridComm, 2010, pp. 79-84.
- [6] E. Liu, J. Bubic, "Distribution system voltage performance analysis for high-penetration analysis for high-penetration photovoltaics" Tech. Rep. NREL/SR-581-42298.[Online]. Available:<http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/42298.pdf>
- [7] P. Garcia, J. Luiz, S. Carneiro, V. da Costa, N. Martins "Three-Phase Power Flow Calculations Using the Current Injection Method", IEEE Trans. Power Deliv., Vol. 15, No. 2, 2000, pp. 508-514.



서재완 (徐在完)

1987년 10월 3일생. 2011년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 2011년~현재 동대학원 전기공학과 석박통합과정.



장문중 (張汶宗)

1970년 4월 24일생. 1997년 KAIST 컴퓨터공학과 졸업. 1997년~현재 전력연구원 스마트에너지연구소 선임연구원. 관심분야는 배전지능화시스템, 전력정보통신 기술개발, 스마트파워그리드 기술개발 및 응용분야.



장길수 (張吉洙)

1967년 10월 26일생. 1991년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 미국 Iowa 주립대학교 전기공학과 졸업(박사). 2006년 미국 Cornell University 방문교수. 현재 고려대학교 전기공학과 교수.

◇ 저자소개 ◇



송중석 (宋鍾碩)

1983년 6월 26일생. 2008년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 2010년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010년~현재 동대학원 전기공학과 박사과정.