

Carbon Free를 위한 도서지역용 독립전원계통의 모델링 및 운용알고리즘에 관한 연구

A Study on the Modeling and Operation Algorithm of Independent Power System for Carbon Free

왕종용* · 김병기* · 박재범* · 김병목* · 김응상** · 노대석†

(Jong-Yong Wang · Byung-Ki Kim · Jea-Bum Park · Byung-Mok Kim · Eung-Sang Kim · Dae-Seok Rho)

Abstract - Recently, as one of the policies for carbon free operation method of independent power system replacing diesel generator with renewable energy such as wind power and photovoltaic(PV) system has been presented. Therefore, this paper proposes an operation algorithm and modeling of independent power system by considering CVCF(constant voltage constant frequency) ESS(energy storage system) for constant frequency and voltage, LC(load control) ESS for demand and supply balancing and SVC(static var compensator) for reactive power compensation. From the simulation results based on the various operation scenario, it is confirmed that proposed operation algorithm and modeling may contribute stable operation and carbon free in independent power system.

Key Words : Carbon free, CVCF ESS, Independent power system, Operation algorithm, PSCAD/EMTDC

1. 서 론

최근 지구 온난화 및 일본의 원전사고, 고유가 등의 에너지 위기와 환경 문제가 전 세계적인 문제로 부각되고 있다. 이러한 에너지 위기와 환경문제를 해결할 수 있는 방안으로 전력시스템의 효율화와 신재생에너지의 도입확대가 해결책으로 시도되고 있으며, 이를 위한 기술적인 수단으로 하나로 도서지역의 마이크로 그리드에 적용되고 있다[1]. 즉, 도서지역에서는 디젤발전기의 가동률을 줄이고 신재생에너지전원의 비중을 높여, 계통을 안정적으로 운용하면서 CO₂ 제로화를 시킬 수 있는 방안들이 연구되고 있다 [2]. 하지만, 관심을 가진 풍력발전기의 기동 시 필요로 하는 유·무효전력을 전기저장장치(energy storage system, ESS)가 공급하지 못하여, 계통에서 풍력발전기가 탈락되는 문제점 등이 보고되고 있다. 따라서 본 논문에서는 신재생에너지전원이 연계된 독립전원계통을 안정적으로 운용하면서 CO₂ 제로화를 하기 위하여, CVCF용 ESS와 부하제어용 ESS, 그리고 SVC 등에 의한 전압제어와 전력제어를 수행하는 독립전원계통의 운용알고리즘을 제안한다. 구체적으로, PSCAD/EMTDC를 이용하여 DFIG의 타입의 풍력발전기와 태양광전원, 부하변동에 따른 주파수와 전압을 일정하게 제어하는 CVCF용 ESS, 풍력발전기를 기동하는 경우에 무효전력을 보상하는 SVC, 계통의 유효전력에 대하여 충·방전을 수행하는

부하제어용 ESS로 구성된 독립전원계통을 모델링을 제시한다. 또한, CVCF용 ESS는 전압 및 주파수를 일정하게 제어하고, 부하제어용 ESS는 계통의 부하를 제어하는 운용알고리즘을 제안한다. 그리고 풍력발전기의 기동 시(torque control mode)와 부하에서 발생되는 무효전력을 보상하기 위하여, SVC를 이용한 운용제어 알고리즘을 제시한다. 본 논문에서 제안한 모델링과 알고리즘을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 상기의 방식이 계통의 신뢰성을 향상시키고, CO₂ 제로화를 이룰 수 있음을 알 수 있었다.

2. 도서지역용 독립전원계통 특성 분석

CO₂ 제로화와 자립운전을 위하여 가파도에 설치된 독립전원계통은 그림 1과 같이 150kW급 디젤발전기 3대, 250kW급 풍력

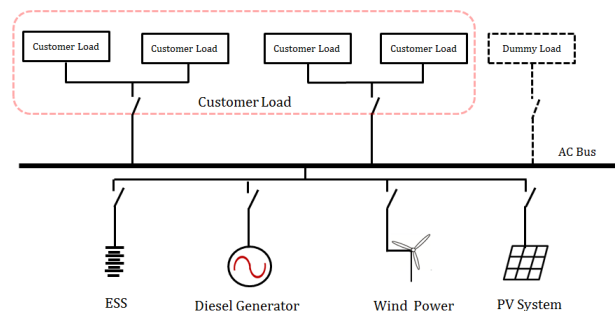


그림 1 기존의 독립전원계통 개념

Fig. 1 Concept of conventional independent power system

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Engineering, Korea University of Technology and Education, Korea
 E-mail : dsrho@kut.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education, Korea

Received : November 11, 2015; Accepted : March 31, 2016

발전기 2기, 500kWh 용량의 ESS, 50kW급 태양광전원 그리고 일반 가정, 학교, 관공서 및 담수화 설비 등을 포함한 수용가 부하로 이루어져 있다[3].

그러나, 독립전원계통에 연계된 풍력발전기가 기동하는 경우, torque control mode에서 소비하는 무효전력을 ESS가 충분히 보상하지 못하여, 풍력발전기가 그림 2와 같이 계통에서 탈락되는 현상이 보고되고 있다.

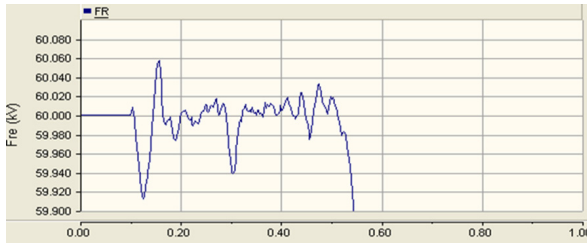


그림 2 독립전원계통의 탈락
Fig. 2 Shut down of independent power system

이러한 문제점을 해석하기 위하여, 2013년 4월 한 달간 250kW급 풍력발전기의 기동 시의 전력량을 분석하였다. 표 1과 같이, 피상전력은 495.9kVA, 유효전력은 415.9kW, 무효전력은 270kVar로 측정되었다. 이 결과로 유추해보면, 풍력발전기의 기동 시에 소비하는 무효전력을 독립전원계통이 충분히 보상하지 못하여 풍력발전기가 탈락되는 현상이 발생한 것으로 평가된다. 따라서, 신재생에너지전원이 연계된 독립전원계통을 안정적으로 운용하기 위해서는 유·무효전력에 대한 적절한 제어방안이 필요함을 알 수 있다.

표 1 풍력발전기 기동 시 운용 특성

Table 1 Operation characteristic at startup wind power

	Apparent	Active	Reactive	Hz	cos θ
Power	495.9	415.9	270	-	-
Frequency	-	-	-	60.11	-
Power Factor	-	-	-	-	0.834

3. 도서지역용 독립전원계통 모델링

3.1 디젤발전기 모델링

디젤발전기의 제어기는 출력전압을 조정하는 여자기와 유효전력을 제어하는 조속기로 구성된다. 여자기는 디젤발전기에서 발생하는 무효전력을 제어하고 출력전압을 정전압으로 제어하는 역할을 수행한다. 또한, 회전기의 계자전압 및 계자전류를 제어함으로써 발전기의 보호기능역할도 담당한다. 이러한 기능을 가지는 여자기 PSCAD/EMTDC로 모델링하면 그림 3과 같이 나타낼 수

있다.

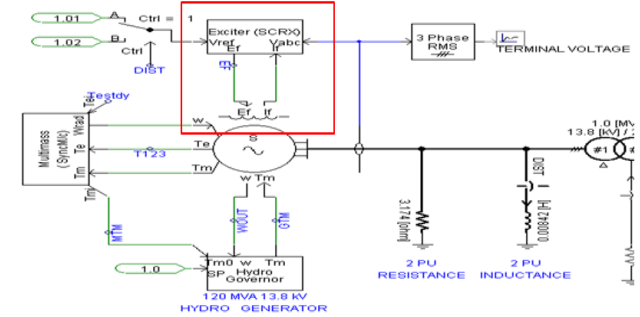


그림 3 디젤 발전기의 여자기 모델링
Fig. 3 Excitor modeling of diesel generator

한편, 디젤발전기 조속기는 회전속도를 일정한 값으로 유지하기 위해 사용하는 제어장치로서, 계통의 수요전력량만큼 제어하는 유효전력 제어부와 디젤 발전기 속도를 계통의 주파수 (60[Hz])에 추종하도록 제어하는 속도제어부로 구성된다. 이러한 조속기를 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하면 그림 4와 같다.

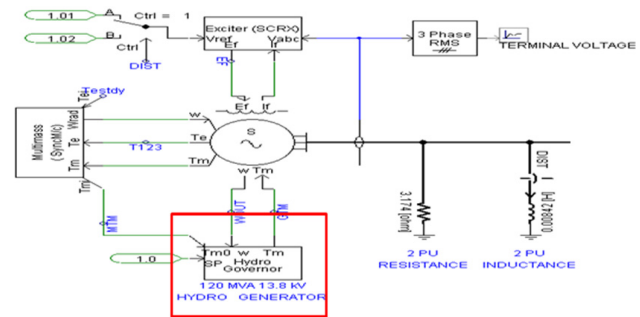


그림 4 디젤 발전기의 조속기 모델링
Fig. 4 Governor modeling of diesel generator

3.2 풍력발전기 모델링

풍력발전의 종류 중 하나인 이중여자유도발전기(DFIG)는 d-q 변환에 의해 독립적인 유효 및 무효전력을 제어하며, 컨버터에 의해 출력을 조정하는 디젤발전기에 비하여 작은 용량의 인버터로도 운용이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 풍력에너지부와 발전량제어, 회전자의 속도, 그리고 유·무효전력을 제어하는 DFIG로 구성된 풍력발전기를 PSCAD/ EMTDC로 모델링하면 그림 5와 같다. 여기에서 풍력발전의 제어기는 간접벡터제어 방법을 이용하여 고정자의 전압과 전류를 이용한 고정자의 자속을 추정하는 회전자측 컨버터(machine side converter, MSC)와 유·무효전력 및 동기 위상각과 계통전압 PLL(Phase-Locked-Loop)을 제어하는 계통측 컨버터(grid side converter, GSC)로 이루어진다 [4-7].

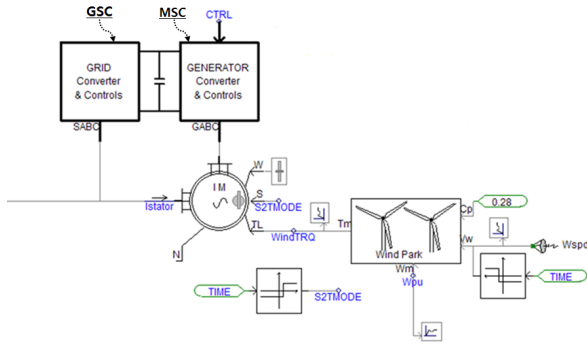


그림 5 DFIG 모델링
Fig. 5 Modeling of DFIG

한편, 풍속에 의하여 블레이드에서 발전기로 공급되는 DFIG의 출력은 블레이드의 출력계수와 공기가 가지는 운동에너지의 곱으로 계산되어진다. 따라서, 블레이드의 형상, 주속비 그리고 피치각에 의한 블레이드의 출력계수는 식 (1)과 같고, 풍속이 가지는 운동에너지는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기에서 λ 는 주속비로서 식 (3)과 같이 풍속, 블레이드의 각속도, 그리고 터빈의 직경에 의하여 결정된다.

$$C_p = \frac{1}{2}(\lambda - 0.022\lambda^2 - 5.6)e^{-0.17\lambda} \quad (1)$$

$$P_{wind} = \frac{1}{2}A\rho V_{wind}^3 \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{R \times \omega}{V_{wind}} \quad (3)$$

여기서, C_p : 에너지 전환 효율, λ : tip speed ratio(주속비), β : 블레이드 피치각, P_{wind} : 풍력발전기 출력, V_{wind} : 풍속, ρ : 공기밀도, ω : 각속도, R: 터빈의 직경

따라서 식 (2)와 식 (3)으로 부터 블레이드에 의한 풍력발전기의 출력을 식으로 나타내면 식 (4)와 같고, 이를 PSCAD/EMTDC로 모델링하면 그림 6과 같이 나타낼 수 있다[8-9].

$$P_{blade} = \frac{1}{2}A\rho(V_{wind})^3 C_p(\lambda) = \frac{1}{2}A\rho\left(\frac{\omega R}{\lambda}\right)^3 C_p(\lambda) \quad (4)$$

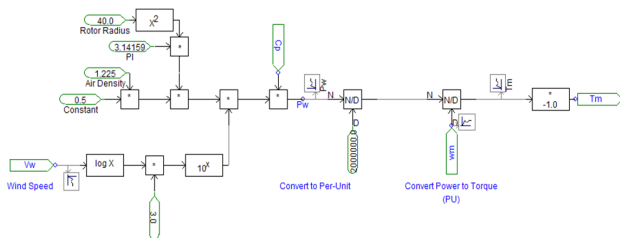


그림 6 풍력발전기 출력식 모델링
Fig. 6 Modeling of Eq. (4)

3.3 부하제어용 ESS 모델링

평형 3상 시스템에서 목표로 하는 ESS의 순시 유효전력(P) 및 순시 무효전력(Q)은 정지좌표계와 동기좌표계를 이용하여 3상 교류를 직류로 변환된 d-q축의 변수들에 의하여 결정되어진다. 즉 동기속도로 회전하는 d-q축에서의 출력전압 V_q 는 출력단의 순시전압의 크기와 동일하고, 출력전압 V_d 는 0이기 때문에 목표로 하는 유효전력과 무효전력은 식 (5)와 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{3}{2} \times |V_0| \times I_{q-ref} \quad (5)$$

$$Q = -\frac{3}{2} \times |V_0| \times I_{d-ref} \quad (6)$$

여기서, V_0 : 순시전압

ESS의 유효전력과 무효전력에 의하여 기준전류(I_{q-ref} , I_{d-ref})를 구하는 식은 식 (7)과 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 즉, 기준전류(I_{dq-ref})가 음의 값을 가질 때 ESS는 충전상태가 되고, 양의 값을 가질 때 ESS는 방전상태가 된다. 여기서 식 (7)은 ESS 유효전력의 출력을 위한 q축 기준전류이고, 식 (8)은 ESS 무효전력의 출력을 위한 d축 기준전류이다.

$$I_{q-ref} = \frac{2}{3} \times P \times \left(\frac{1}{V_0}\right) \quad (7)$$

$$I_{d-ref} = -\frac{2}{3} \times Q \times \left(\frac{1}{V_0}\right) \quad (8)$$

여기서, I_{q-ref} : ESS 출력을 위한 q축 기준전류, I_{d-ref} : ESS 출력을 위한 d축 기준전류

따라서, ESS의 충·방전 상태를 결정하는 I_{dq-ref} 와 인버터의 전류제어방식을 적용한 ESS의 제어기를 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하면 그림 7과 같다[10].

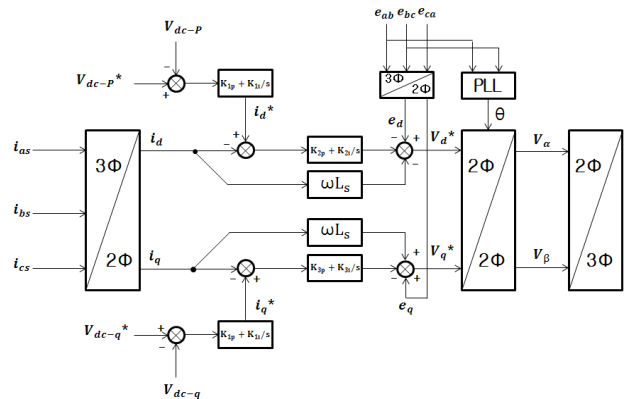


그림 7 부하제어용 ESS 모델링
Fig. 7 Modeling of ESS for load control

3.4 CVCF용 ESS 모델링

도입된 계통의 부하가 변동하는 경우, 발전기 대신 일정한 전압과 주파수 제어를 수행하기 위하여 도입된 CVCF용 ESS는 출력전압을 일정하게 유지하기 위해 출력전압 제어루프를 적용하게 되는데, 이 제어루프를 적용하기 위한 인버터의 회로방정식은 식 (9)와 식 (10)과 같이 표현된다.

$$C \frac{dV_c}{dt} = I_{inv} - I_{load} \quad (9)$$

$$L \frac{dI_{inv}}{dt} = V_t - V_c \quad (10)$$

여기서, V_t : 인버터 전압, V_c : 커패시터 전압, I_{inv} : 인버터 전류, I_{load} : 부하전류, L : 출력필터용 인덕턴스, C : 출력필터용 커패시터

상기의 식 (9)와 식 (10)을 동기좌표계로 변환하여, 목표모 하는 DC 출력을 구하면 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다[11].

$$V_{dc} I_{dc} = \frac{3}{2} (v_{cq} i_{iq} + v_{cd} i_{id}) \quad (11)$$

여기서, V_{dc} : 직류링크단의 전압, I_{dc} : 직류링크단의 전류, v_{cq} : 커패시터의 q축 전압, i_{iq} : 계통 측 q축 출력전류, v_{cd} : 커패시터의 d축 전압, i_{id} : 계통 측 d축 출력전류

한편, 식 (11)로부터 전압제어를 수행하기 위하여, 계통 측의 3상이 평형상태이면 회전자표계를 적절히 조정하여 $v_{cq} = V_m$ (목표출력전압), $v_{cd} = 0$ 이 되도록 설정하고, 단위역률이 1로 되도록 제어한다.

즉, d-q 좌표축변환에 의해 발생한 성분인 $\omega L i_q$, $\omega C v_{cd}$, $\omega C v_{cq}$ 를 제어단계에서 전향(feedforward) 보상하게 되면 $v_{cq} = V_m$, $v_{cd} = 0$ 으로 결정되어, 역률은 1로 제어되어진다. 따라서, 커패시터의 출력전압 v_{cq} 는 목표 출력전압 V_m 과 같게 되어 CV (constant voltage)운전을 수행하게 된다. 이것을 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다[12].

$$i_q = -\frac{1}{L} v_{cq} + \frac{v_q}{L} - \omega v_{cd} \quad (12)$$

$$\dot{v}_{cq} = -\frac{2V_{dc}I_{dc}}{3Cv_{cq}} + \frac{i_q}{C} - \omega v_{cd} \quad (13)$$

$$i_d = -\frac{1}{L} v_{cd} + \frac{1}{L} + \omega i_q \quad (14)$$

$$\dot{v}_{cd} = -\frac{2V_{dc}I_{dc}}{3Cv_{cd}} + \frac{i_d}{C} + \omega i_d \quad (15)$$

따라서, 상기의 식 (12) ~ 식 (15)에 의하여 CVCF용 ESS 제어를 모델링하면 그림 8과 같다.

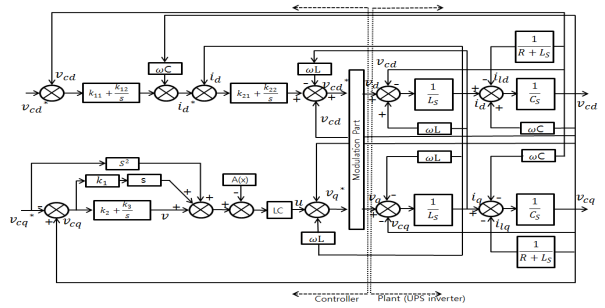


그림 8 CVCF ESS의 모델링
Fig. 8 Modeling of CVCF ESS

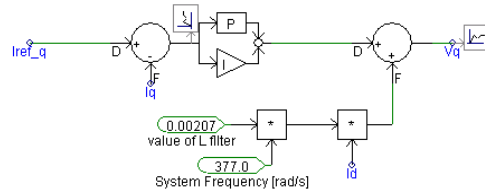
3.5 태양광전원 모델링

태양광전원용 연계형 인버터에 대하여 목표로 하는 유효전력과 무효전력을 제어하기 위하여, PI제어기를 이용한 세부적인 전류제어 알고리즘은 식 (16)과 식 (17)과 같고, 이 제어 모델링은 그림 9와 같다. 여기서 전류 제어부는 디커플링 회로이기 때문에 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다.

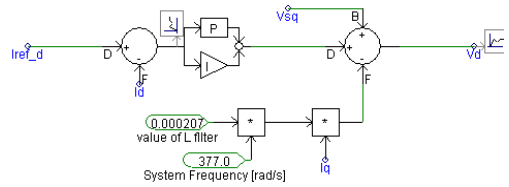
$$V_d = (I_{ref-d} - I_d) \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) - I_q \cdot \omega L + V_{sq} \quad (16)$$

$$V_q = (I_{ref-q} - I_q) \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) + I_d \cdot \omega L \quad (17)$$

여기서, V_d , V_q : 인버터 출력을 위한 d-p축 전압, I_{ref-d} : 인버터 출력의 기준전류, I_q , I_d : d-q동기좌표계에 의한 계통전류 (직류), V_{sq} : 계통의 순시전압



(a) 전류제어 모델링(q축) (Modeling of current control)



(b) 전류제어 모델링(d축) (Modeling of voltage control)

그림 9 태양광전원의 전류제어 알고리즘 모델링
Fig. 9 Modeling of current control in PV system

한편, 그림 10은 계통연계 인버터의 모델링으로서, 이는 PWM 으로부터 나온 6개의 스위칭 신호에 의하여 구동되는 IGBT는 태양광전원에서 생성된 DC 출력을 120°의 위상차를 갖는 3상의 AC 출력으로 변환시킨다.

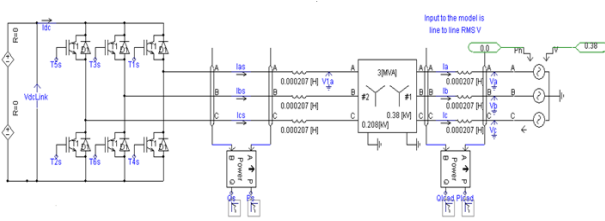


그림 10 계통연계형 인버터 모델링
Fig. 10 Modeling of grid-connected inverter

4. CO₂ 제로화를 위한 독립전원계통 운용알고리즘

4.1 독립전원계통 운용전략

본 논문에서는 도서지역용 독립전원계통의 CO₂ 제로화를 위하여, 디젤발전기를 가능한 운용하지 않는 대신에 CVCF용 ESS와 부하제어용 ESS 그리고 SVC를 이용하여 독립전원계통을 안정적으로 운용하는 알고리즘을 제시한다. 즉, 그림 11과 같이, CVCF용 ESS는 전압 및 주파수 제어를 담당하고, 부하제어용 ESS는 충전 및 방전을 통하여 계통의 유효전력을 제어하도록 한다. 또한 풍력발전기의 기동 시(torque control mode) 필요로 하는 무효전력을 보상하기 위하여, 정지형 무효전력보상기인 SVC를 계통에 도입하여 무효전력을 제어하는 운용알고리즘을 제안한다.

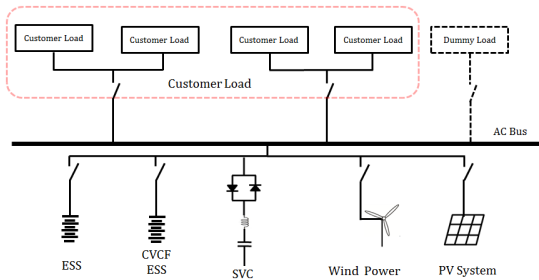


그림 11 제안한 독립전원계통의 개념
Fig. 11 Concept of proposed independent power system

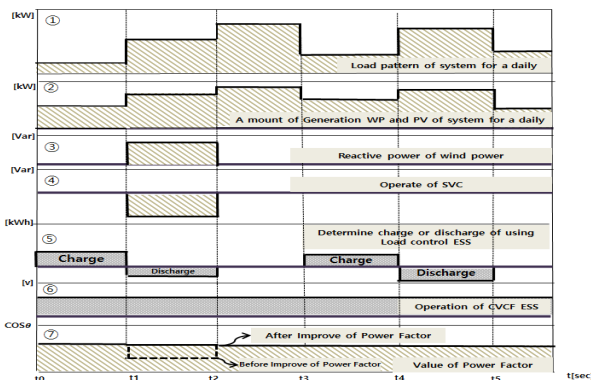


그림 12 독립전원계통의 운용 전략
Fig. 12 Operation strategy of independent power system

한편, 상기에서 제안한 독립전원계통의 운용알고리즘을 상세하게 나타내면 그림 12와 같다. 먼저 수용가 부하패턴과 신재생에너지전원(태양광전원, 풍력발전)의 출력패턴을 그림 12의 ①과 ②로 가정한 경우, 풍력발전이 t₁에서 기동하게 되면, 그림 12의 ③과 같이 t₁~t₂기간(torque control mode)동안 풍력발전기에서는 무효전력이 발생할 수 있다. 이때 SVC는 그림 12의 ④와 같이 t₁~t₂기간 동안 발생된 무효전력을 보상하여 계통을 안정적으로 유지시킨다. 또한, 부하제어용 ESS는 그림 12의 ⑤과 같이 부하와 신재생에너지의 출력을 동일하게 유지시키기 위하여 충전과 방전을 실시하게 되고, CVCF용 ESS는 그림 12의 ⑥과 같이 지속적으로 전압 및 주파수를 유지시킨다.

(1) ESS의 운용 전략

디젤발전기 대신 일정한 전압과 주파수를 유지하기 위한 CVCF용 ESS의 운용조건은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{ESS-ref} = constant V \tag{18}$$

$$f_{ESS-ref} = constant f \tag{19}$$

여기서, $V_{ESS-ref}$: ESS의 제어 전압, $Constant V$: 목표 전압, $f_{ESS-ref}$: ESS의 제어 주파수, $Constant f$: 목표 주파수

한편, 부하제어용 ESS는 수용가의 부하량($P_{cus,i}$)과 신재생에너지의 발전량($P_{renew,j}$)을 비교하여, 부하량이 발전량보다 크게 되면 방전($\sigma = 1$)을 하게 되고, 부하량이 발전량보다 작게 되면 충전($\sigma = -1$)을 수행하게 된다. 또한, 부하량이 신재생에너지 발전량과 같게 되면 부하제어용 ESS는 동작을 중지($\sigma = 0$)하게 되는데, 이 운용조건을 나타내면 다음 식과 같다.

$$\sigma(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } \sum_{i=1}^n P_{cus,i} - \sum_{j=1}^n P_{renew,j} > 0 \\ -1 & \text{if } \sum_{i=1}^n P_{cus,i} - \sum_{j=1}^n P_{renew,j} < 0 \\ otherwise & \text{if } \sum_{i=1}^n P_{cus,i} - \sum_{j=1}^n P_{renew,j} = 0 \end{cases} \tag{20}$$

여기서, $\sigma(t)$: ESS의 충전 및 방전 결정 신호, $P_{renew,j}$: 신재생에너지 발전량, P_{WP} : 풍력 발전기의 발전량, P_{PV} : 태양광전원의 발전량

(2) SVC의 운용 전략

SVC는 풍력발전의 기동 시 요구되는 무효전력을 보상하기 위하여 도입되는데 이것은 역률 크기에 따라 운용하도록 한다. 즉, SVC는 역률이 진상이면 리액터(Reactor)를 연계시키고, 역률이 지상이면 커패시터(Capacitor)를 연계시키게 된다. 이 판단조건을 나타내면 식 (21)과 같다.

$$\lambda(t) = \begin{cases} Lagging Factor & \text{if } |PF| < 1 \text{ and } PF < 0 \\ Leading Factor & \text{if } |PF| < 1 \text{ and } PF > 0 \\ PF = 1 & PF = 1 \end{cases} \tag{21}$$

여기서, $\lambda(t)$: SVC 동작 결정 신호

한편, 목표치 역률에 대하여 SVC에 의하여 보상되는 무효전력량은 식 (22)와 같이 수용가 부하의 무효전력과 신재생에너지전원의 무효전력 합에 의하여 결정된다.

$$Q_{svc}(t) = \lambda \times \{Q_{cus.i}(t) + Q_{renew.j}(t)\} \quad (22)$$

여기서, $Q_{svc}(t)$: 무효전력의 합, $Q_{cus.i}(t)$: 부하의 무효전력, $Q_{renew.i}(t)$: 신재생에너지의 무효전력

4.2 독립전원계통 운용 알고리즘

본 논문에서 제안한 ESS와 SVC의 운용전략에 의하여 독립전원계통의 운용 알고리즘은 다음과 같다.

- [Step 1] 초기조건으로 CVCF용 ESS는 독립전원계통의 정전압 및 정주파수를 제어한다.
- [Step 2] 일 부하곡선을 기준으로, 수용가 부하량과 신재생에너지전원의 발전량을 비교한다.
- [Step 3] 부하제어용 ESS는 발전량이 부하량보다 클 경우 충전을 수행하고, 발전량이 부하량보다 적을 경우 방전을 수행한다. 여기서, 발전량과 부하량이 같다면 운용을 중지하게 된다.
- [Step 4] SVC는 풍력발전의 기동 시 요구되는 무효전력을 보상하기 위하여, 역률 크기에 따라 운용하도록 한다. 즉, SVC는 역률이 진상역률에서는 리액터(Reactor)를 연계시키고, 지상역률에서는 커패시터(Capacitor)를 연계시키도록 하며 목표로 하는 역률(1.0)을 맞추기 위하여 적절한 용량을 산정하도록 한다.

상기의 절차를 플로우차트로 나타내면 그림 13과 같다.

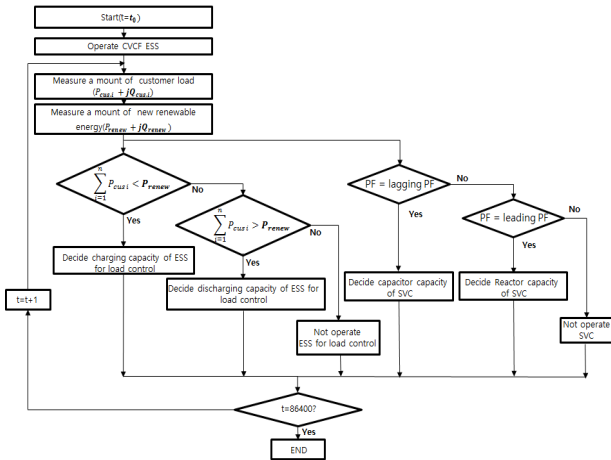


그림 13 운용전략 알고리즘

Fig. 13 Process of operation strategy

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

(1) 독립전원계통의 구성

본 논문에서 제안한 독립전원계통 모델링과 운용알고리즘의 유용성을 확인하기 위하여, 대상계통은 그림 14와 같이 기존의 독립전원계통(디젤발전기, 풍력발전기, 태양광전원, 수용가부하)에 정전압 및 정주파수 제어를 위한 CVCF용 ESS와 부하제어용 ESS 그리고 무효전력을 제어하기 위한 SVC로 구성된다. 여기에서 각 구성에 대한 용량은 실제통과 동일하게 적용하였으며, 이에 대한 상세 데이터는 표 2와 같다. 단, CVCF용 ESS는 계통의 정전압 및 정주파수 제어를 수행할 수 있는 최소 용량으로 가정한다.

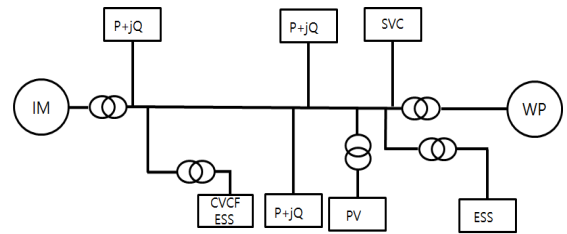


그림 14 독립전원계통의 계통 구성도

Fig. 14 System configuration of independent power system

표 2 독립전원계통 각 전원의 용량

Table 2 Capacity of each power source

Power source	Capacity
Diesel generator	450[kW]
PV system	110[kW]
Wind power	500[kW]
ESS	500[kWh]

(2) 독립전원계통의 운용조건

본 논문에서 제안한 독립전원계통의 운용알고리즘의 타당성을 입증하기 위하여, 본 논문에서는 표 3과 같이 디젤발전기 연계시의 독립전원계통 운용방식(Case I), 디젤발전기 비 연계시의 독립전원계통 운용방식(Case II), 그리고 제안한 독립전원계통 운용방식(Case III)으로 나누어 계통의 운용특성을 분석한다.

표 3 독립전원계통의 운용 시나리오

Table 3 Operation scenario of independent power system

	Case I	Case II	Case III
Diesel Generator	Operation	Not operation	Not operation
PV system	Operation	Operation	Operation
Wind Power	Operation	Operation	Operation
SVC	Not Operation	Not Operation	Operation
ESS for Load	Operation	Not Operation	Operation
ESS for CVCF	Not Operation	Operation	Operation

5.3 시나리오별 독립전원계통의 특성 분석

(1) 디젤발전기 연계 시의 독립전원계통(Case I)운용특성

여기서는 표 3의 Case I의 운용조건에 대하여, 독립전원계통의 운용특성을 분석한다. 먼저, 풍력발전기가 0.3초 후에 기동하고, 2초 후에는 풍력발전기를 포함한 신재생에너지의 발전량이 수용가 부하량보다 커진다는 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 15와 같이, 계통전압은 신재생에너지전원의 역조류에 의하여 급격하게 변동하는 특성을 보이게 됨을 알 수 있고, 그림 16과 같이 주파수도 규정범위를 벗어남을 알 수 있다.



그림 15 기존 방식에 의한 전압 특성 분석
Fig. 15 Voltage characteristic by conventional method

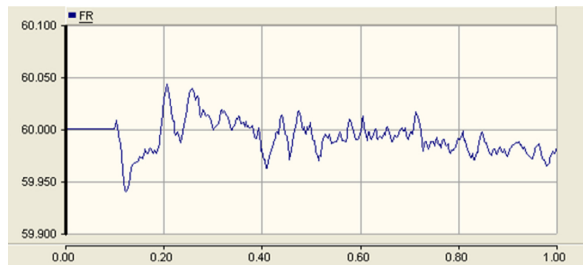


그림 16 기존 방식에 의한 주파수 특성 분석
Fig. 16 Frequency characteristic by conventional method

(2) 디젤발전기 비 연계 시의 독립전원계통 (Case II) 운용특성

여기에서는 표 3의 Case II와 같이 디젤발전기가 연계되지 않은 경우에 대하여 독립전원계통의 운용특성을 분석한다. 즉, 풍력발전기가 Torque Control Mode로 기동하는 경우, 그림 17과 같이 계통전압이 급격하게 변동(강하)하게 되고, 또한 그림 18과 같이 주파수도 규정범위를 벗어나게 되어 풍력발전기가 계통에서 탈락됨을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 CVCF용 ESS만으로 풍력발전기의 기동 시에 요구되는 유·무효전력을 충분히 보상하지 못하여 풍력발전기가 계통에서 탈락되기 때문이다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 CVCF용 ESS뿐만 아니라 유·무효전력을 독립적으로 제어할 수 있는 부하제어용 ESS와 SVC의 도입이 필수적임을 알 수 있다.



그림 17 디젤 발전기 비연계 시 전압 특성 분석
Fig. 17 Voltage characteristic by using only CVCF ESS

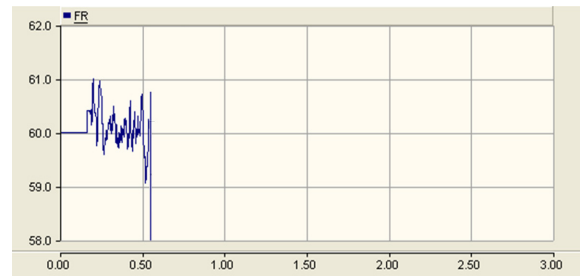


그림 18 디젤 발전기 비 연계 시 주파수 특성 분석
Fig. 18 Frequency characteristic by using only CVCF ESS

(3) 제안한 독립전원계통(Case III) 운용특성

상기와 같이 풍력발전기가 탈락되는 현상 등의 문제점을 해결하기 위하여, 본 논문에서는 수요와 공급을 일치시키는 부하제어용 ESS와 무효전력을 제어하기 위한 SVC를 도입하여 독립전원계통을 운용하는 방식(Case III)을 제안하였고, 이에 대한 계통운용특성을 다음과 같이 분석한다. 즉, 풍력발전기가 기동하는 동안 (Torque Control Mode), SVC에 의하여 무효전력이 제어되어, 그림 19와 같이 계통전압이 안정적인 상태를 유지함을 알 수 있고 또한, 그림 20과 같이 CVCF용 ESS와 부하제어용 ESS에 의하여 주파수도 안정적으로 유지됨을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 방식으로 독립전원계통을 운용한다면, 계통의 신뢰성을 향상시키고, CO₂를 저감시킬 수 있음을 알 수 있다.

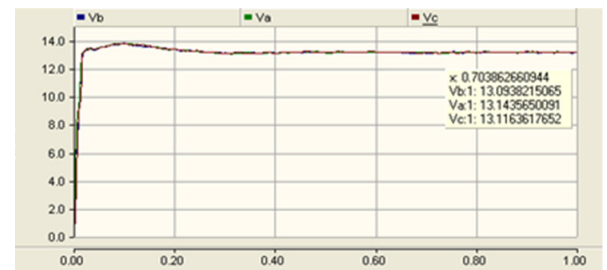


그림 19 제안한 방식에 의한 전압 특성 분석
Fig. 19 Voltage characteristic by proposed method

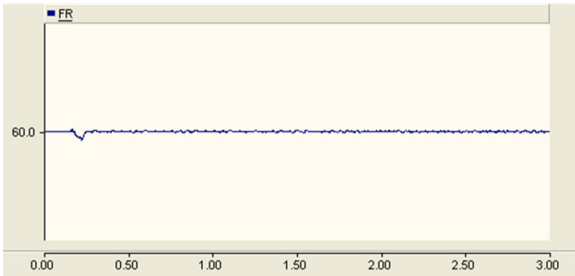


그림 20 제안한 방식에 의한 주파수 특성 분석
Fig. 20 Frequency characteristic by proposed method

6. 결 론

본 논문에서는 독립전원계통의 안정적인 운용과 CO₂ 제로화를 위하여, CVCF용 ESS와 부하제어용 ESS 그리고 SVC를 이용한 독립전원계통의 모델링 및 운용알고리즘을 제안하였다. 이에 대한 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) Case I 과 같이 기존 독립전원계통의 경우, 계통전압과 주파수는 신재생에너지전원의 역조류와 급격한 변동(기동)에 의하여 규정치를 벗어나 기준에 연계되어 있는 디젤발전기가 정지하는 현상을 확인하였다.
- (2) Case II와 같이 CO₂를 제로화를 위하여 디젤발전기를 연계하지 않고 CVCF용 ESS로 운용하는 경우, 풍력발전기 기동 시 독립전원계통의 계통전압과 주파수가 급격히 변동하게 되고, 이에 따라 풍력발전기가 계통에서 탈락되는 문제점이 발생함을 알 수 있었다.
- (3) 기존의 문제점을 해결하기 위하여, CVCF용 ESS와 부하제어용 ESS 그리고 SVC를 조합한 운용방식(Case III)에서는 풍력발전기가 기동하는 동안 SVC가 무효전력을 제어하여 계통전압이 안정적인 상태로 유지됨을 알 수 있었고, 또한 주파수도 CVCF용 ESS와 부하제어용 ESS에 의하여 안정적으로 유지됨을 확인할 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제안한 방식에 의하여 독립전원계통을 운용하면, 안정적인 운용과 CO₂ 제로화를 이룰 수 있음을 확인하였다. 또한 본 논문에서 제시한 독립전원계통의 모델링과 운용알고리즘을 바탕으로, 각 시나리오별 탄소배출의 계량화 및 제안한 방식에 대한 독립전원계통의 경제성 분석은 상용화를 목적으로 연구 중이다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 20131020400720)

References

- [1] Jin-Hong Joen, Kyung-Hoon Kim, Chul-Sang Hwang, Jang-Mok Kim "A Novel Frequency Tracker for Islanded-Mode Operation in Mircogrid", KIEE, Vol.60, No.6, pp. 1331-1338, June, 2011.
- [2] JAE-EON KIM, "Modeling & Operating Algorithm of Islanding Microgrid with Wind Turbine, Diesel Generator and BESS", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.15, No. 9, pp. 5893-5898, 2014.
- [3] Seung-Mo Kim, Seung-Jin Oh, Jung-Hak Lee, Tae-Hyeong Kim, Byung-Ki Kwon, Jae-Min Ahn, Kyung-Min Jin and Chang-Ho Choi "The Application and Verification of the 2MW Battery Energy Storage System(BESS) with Wind-turbine in Micro-grid of Gapado, Jeju", The Transactions of the Korea Institute of Power Electronics, Vol. 19, No. 4, pp. 303-311, August 2014.
- [4] So-Hee Kim, Byung-Ki Kim and Dae-Seok Rho "A study on Fault Characteristics of Wind Power in Distribution System" Journal of the Korea Academia- Industrial cooperation Society, Vol. 13, No. 3, pp. 1288- 1295, March 2012.
- [5] H. Y. Seo, B. G. Park, J. M. Kim, J. W. Kim, K. C. Lee, D. J. Kim, C. H. Oh, P. G. Kim, H. U. Ha, S. H. Moon, "Parameter Estimation for Indirect Vector Control of Induction Motor", Korean Society of Precision Engineering, pp. 19-20, 2012.5.
- [6] Jin-Ho Choi, Jae-Hae Shin, Young-Seok Kim, "Design of Indirect Vector Controller of Induction Motor using Fuzzy Algorithm and apply to the Speed Control System of Elevator", The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 352-354, 2000.11.
- [7] Gilberto C. D. Sousa, member, IEEE, Bimal K. Bose. Fellow, IEEE and John G. Cleland, "Fuxxy Logic Based On-Line Efficiency Optimization Control of an Indirect Vector-Controlled Induction Motor Drive", IEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 42, No. 2, pp. 192-198, April, 1995
- [8] Won-Hyo Lee, Hyun-Jae Yoo, Myong-Chul Shin "A study on the PSCAD/EMTDC modeling of the Double Fed Induction Generator(DFIG)", KIEE, Vol. 12, No. 2, pp. 1740-1741, July, 2012.
- [9] Seung Jin Oh, Min Young Cha, Jong Won Kim, Jong Kyou Jeong, Byung Moon Han and Byung Hoon Chang "Development of Hardware Simulator for DFIG Wing Power System Composed of Anemometer and Motor-Generator Set ", The Korean Institute of Power Electronics, Vol.16, No.1, pp. 11-19, February, 2011.

[10] Byungki Kim, Giyoung Kim, Jukwang Lee, Sungsik Choi and Daeseok Rho, "A Study on the Modeling of Step Voltage Regulator and Energy Storage System in Distribution System Using the PSCAD/EMTDC", Journal of the Korea Academic-Industrial cooperation Society, Vol. 16, No. 2, pp.1355~1363, 2015.3

[11] Jaebum Park, Byungki Kim and Daeseok Rho, "Development of State of Charge and Life Cycle Evaluation Algorithm for Secondary Battery", Journal of the Korea Academic-Industrial cooperation Society, Vol. 14, No. 1, pp.369~377, 2013.1

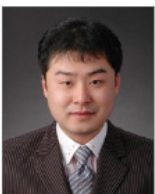
[12] H. K. Kim, A. Abo-Khalil, D.C. Lee, J.K. Seok "CVCF Control of Stand-Alone Wind Power System", The Korean Institute of Power Electronics, pp. 379-382, July, 2003.

저 자 소 개



왕 종 용 (Jong-Yong Wang)

2012년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학 (공학사), 2014년 2월~현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학과 전기공학전공 석사과정 재학 중
 <관심분야> 신재생에너지, 전력계통, 마이크로그리드



김 병 기 (Byung-Ki Kim)

2008년 1월 : 한국기술교육대학교 전기공학 (공학사), 2012년 2월 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 전기공학전공(공학석사), 2015년 8월 : 동대학원 전기전자통신공학부 전기공학전공(공학박사) 현재 : 박사 후 연구원
 <관심분야> 배전계통 운용, 신재생에너지, 스마트그리드, 품질해석



박 재 범 (Jea-Bum Park)

2011년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사), 2014년 2월 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 전기공학전공 (공학석사), 2014년 3월~현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 전기공학 박사과정 재학 중
 <관심분야> 배전계통 운용, 신재생에너지, 스마트그리드, 2차 전지



김 병 목 (Byung-Mok Kim)

2011년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사), 2014년 2월 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 전기공학전공(공학석사), 2014년 3월~현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 전기공학 박사과정 재학 중
 <관심분야> 배전계통 운용, 신재생에너지, 스마트그리드



김 응 상 (Eung-Sang Kim)

1988년 2월 : 서울산업대 전기공학과 졸업, 1991년 2월 : 숭실대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1997년 2월 : 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 : 한국전기연구원 스마트배전연구센터 책임연구원
 <관심분야> 신재생에너지시스템, 전력저장장치, 스마트그리드, DC배전



노 대 석 (Dae-Seok Rho)

1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사), 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과(공학석사), 1997년 3월 : 일본 북해도대학교대학원 전기공학과(공학박사), 1987년 3월~1998년 8월 : 한국전기연구소 연구원/선임연구원, 1999년 3월~현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수
 <관심분야> 전력/배전 계통, 분산전원 연계, 전력품질해석